Topographie opérationnelle

Mesures – Calculs – Dessins – Implantations

Michel **Brabant**

avec le concours de Béatrice **Patizel,** Armelle **Piègle** et Hélène **Müller**

EYROLLES

Photos de couverture © Arnaud Rostand & Sébastien Paulin, ESGT.
En première page de couverture à gauche et à droite : station totale Trimble 5600 robotisée ; au centre : récepteur fixe GPS/GNSS Trimble R6, liaison par radio UHF au mobile (mode de levé en temps réel).
En quatrième page de couverture de haut en bas : récepteur mobile GPS/GNSS Trimble R6 couplé au carnet de terrain Trimble TSC2 (levé de détails) ; extraits d'un nuage de points réalisé avec un laser scanner 3D (détails, Château d'Allinges, Haute-Savoie) ; laser scanner 3D Leica HDS 6100 à mesure de phase.

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.
© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-12847-5

Table des matières

Chapitre 1. Connaissances de base 1

1.1 Travaux topographiques 1

1.1.1 Le levé topographique 1
1.1.2 Les calculs topométriques 2
1.1.3 Les dessins topographiques 2
1.1.4 Projets d'aménagement 2
1.1.5 Implantations 3
1.1.6 Suivi et contrôle des ouvrages 3

1.2 Les systèmes de coordonnées 3

1.2.1 Coordonnées cartésiennes géocentriques X, Y, Z 3
1.2.2 Coordonnées géographiques λ, ϕ, h 4
1.2.3 Coordonnées planes E, N 5
1.2.3.1 *Systèmes de projection* 5
1.2.3.2 *Lambert Zone* 6
1.2.3.3 *Lambert 93* 8
1.2.3.4 *Conique conforme 9 zones (CC 9 zones)* 8
1.2.3.5 *Projection UTM (Universal Transverse Mercator)* 9
1.2.3.6 *Paramètres des différents systèmes* 10
1.2.4 Transformation de coordonnées 10
1.2.4.1 *Coordonnées géographiques* λ, ϕ ⇔ *planes* E, N 10
1.2.4.2 *Changement de système géodésique* 11

1.3 Systèmes géodésiques 12

1.3.1 Les systèmes terrestres 12
1.3.1.1 *La Nouvelle Triangulation de la France* 12
1.3.1.2 *ED50 (European Datum 1950)* 13
1.3.2 Les systèmes spatiaux 13
1.3.2.1 *RGF93 (Réseau Géodésique Français 1993)* 13
1.3.2.2 *Autres réseaux* 15

1.4 Les systèmes d'altitudes 17
1.4.1 Altitudes 17
1.4.2 Réseaux de nivellement 17
1.4.3 Repères de nivellement 18
1.4.4 Hauteur et altitude 21

1.5 Observations topographiques 22
1.5.1 Angles (§ 2) 22
1.5.2 Distances (§ 3) 23
1.5.3 Dénivelées (§ 4) 23
1.5.4 Positionnement satellitaire (§ 6) 24

1.6 Précision des observations 24
1.6.1 Lexique 24
1.6.2 Erreurs parasites ou fautes 24
1.6.3 Erreurs systématiques 25
1.6.3.1 *Erreur de justesse* 25
1.6.3.2 *Évaluation sommaire de l'erreur de justesse* 25
1.6.3.3 *Droite moyenne* 26
1.6.4 Erreurs accidentelles des mesures directes 27
1.6.4.1 *Erreur absolue* 27
1.6.4.2 *Répartition expérimentale* 29
1.6.4.3 *Probabilité - Espérance mathématique* 31
1.6.4.4 *Loi normale ou loi de Laplace-Gauss* 31
1.6.4.5 *Indices de dispersion* 34
1.6.4.6 *Estimation de la moyenne* 35
1.6.4.7 *Tolérances* 38
1.6.5 Erreurs accidentelles des mesures indirectes 38
1.6.5.1 *Principe de l'indépendance des erreurs* 38
1.6.5.2 *Composition des écarts-types d'une mesure indirecte* 39
1.6.5.3 *Observations d'inégales précisions - Moyenne pondérée* 40
1.6.6 Classes de précision 42
1.6.6.1 *Précision* 42
1.6.6.2 *Classes* 42

1.7 La carte de base 45
1.7.1 Série bleue et TOP 25 45
1.7.2 Exactitude 46
1.7.3 Mesures planimétriques 47
1.7.3.1 *Coordonnées géographiques dans le système géodésique français* 47
1.7.3.2 *Système géodésique mondial WGS84 ou RGF93* 48
1.7.3.3 *Coordonnées Lambert* 48
1.7.3.4 *Coordonnées UTM* 49
1.7.3.5 *Distances* 49
1.7.3.6 *Gisement* 50

1.7.3.7 *Azimut géographique* 50
1.7.3.8 *Azimut magnétique* 50
1.7.3.9 *Orientation de la carte* 51
1.7.3.10 *Angle horizontal de deux directions* 51
1.7.4 Orographie 51
1.7.5 Exploitation de l'orographie 52
1.7.5.1 *Pente en un point* 52
1.7.5.2 *Altitude d'un point* 53
1.7.5.3 *Lignes et formes caractéristiques* 53
1.7.5.4 *Coupes et profils* 53
1.7.5.5 *Chevelu* 54
1.7.5.6 *Bassin versant* 54
1.7.6 La cartographie numérique 55
1.7.6.1 *Le Référentiel à grande échelle (RGE)* 55
1.7.6.2 *La Banque de données topographiques (BD Topo)* 55
1.7.6.3 *Le SCAN 25* 55
1.7.6.4 *Le Géoportail* 55

Chapitre 2. Mesures des angles 57

2.1 Le théodolite 57
2.1.1 Conception 57
2.1.2 Pivot 59
2.1.2.1 *Embase* 59
2.1.2.2 *Calage du pivot* 60
2.1.3 Cercle horizontal 62
2.1.3.1 *Goniomètre* 62
2.1.3.2 *Lectures* 62
2.1.3.3 *Mouvements* 63
2.1.4 Cercle vertical 63
2.1.5 Axe optique 64
2.1.5.1 *Lunette* 64
2.1.5.2 *Mise au point* 65
2.1.5.3 *Qualités d'une lunette* 66

2.2 Précision des mesures d'angles 66
2.2.1 Erreurs parasites 66
2.2.2 Erreurs systématiques 67
2.2.2.1 *Défaut de verticalité du pivot* 67
2.2.2.2 *Inégalité des échelons du limbe* 67
2.2.2.3 *Excentricité des cercles* 67
2.2.2.4 *Défaut d'horizontalité de l'axe de basculement* 67
2.2.2.5 *Excentricité du viseur* 68
2.2.2.6 *Collimation horizontale* 68
2.2.2.7 *Dérive* 68

2.2.2.8 *Correction d'index ou collimation verticale* 68
2.2.2.9 *Erreur de réfraction* 68
2.2.3 Erreurs accidentelles 68
2.2.3.1 *Erreur de centrage* 68
2.2.3.2 *Erreur de pointé* 68
2.2.3.3 *Erreur de lecture* 69
2.2.3.4 *Flamboiement de l'air* 69
2.2.4 Écarts-types 69

2.3 Mesurage d'un angle horizontal 69
2.3.1 Mises en station 69
2.3.2 Séquence 70
2.3.3 Paires de séquences 71
2.3.4 Tour d'horizon 73

2.4 Mesurage d'un angle zénithal 75
2.4.1 Observations 75
2.4.2 Correction d'index 75
2.4.3 Application 76

2.5 Orientation 77
2.5.1 Orientation dans le système de projection 77
2.5.2 Orientation magnétique 77
2.5.3 Orientation gyroscopique 78
2.5.4 Orientation astronomique 78

Chapitre 3. Mesures des distances 81

3.1 Mesurage au ruban 81
3.1.1 Jalonnement 81
3.1.1.1 *Jalonnement sans obstacle* 82
3.1.1.2 *Franchissement d'une butte* 83
3.1.1.3 *Obstacle de faible largeur* 84
3.1.1.4 *Prolongement* 84
3.1.2 Méthodes de mesurage 85
3.1.2.1 *À plat* 85
3.1.2.2 *Étalonnage et dilatation* 85
3.1.2.3 *Ruban suspendu horizontal* 86
3.1.3 Précision 87
3.1.3.1 *Erreurs parasites* 87
3.1.3.2 *Erreurs systématiques* 87
3.1.3.3 *Erreurs accidentelles* 88
3.1.3.4 *Écarts-types* 88
3.1.4 Réductions des mesures à plat 88

3.2 Mesurage électronique 89
3.2.1 Principe 89
3.2.2 Onde modulée 90
3.2.3 Synoptique 91
3.2.3.1 *Schéma* 91
3.2.3.2 *Réflecteur* 92
3.2.4 Distancemètres de topographie 93
3.2.4.1 *Modulaires* 93
3.2.4.2 *Intégrés* 93
3.2.4.3 *Lasers pulsés sans réflecteur* 94
3.2.5 Précision 95
3.2.5.1 *Erreurs parasites* 95
3.2.5.2 *Erreurs systématiques* 95
3.2.5.3 *Erreurs accidentelles* 97
3.2.5.4 *Écarts-types* 97
3.2.6 Réductions des mesures électroniques des distances 97

Chapitre 4. Nivellement 101

4.1 Nivellement direct ordinaire 101
4.1.1 Observations 101
4.1.2 Niveaux et mires 102
4.1.2.1 *Niveaux-blocs à nivelle torique* 102
4.1.2.2 *Niveaux automatiques* 103
4.1.2.3 *Lecture sur mire ordinaire* 104
4.1.2.4 *Niveaux numériques, mires code-barres* 105
4.1.3 Dénivelée élémentaire 106
4.1.3.1 *Points en dessous du plan de visée* 106
4.1.3.2 *Points au-dessus du plan de visée* 107
4.1.4 Cheminement encadré 108
4.1.4.1 *Observations* 108
4.1.4.2 *Calcul des altitudes* 110
4.1.4.3 *Algorithme* 111
4.1.4.4 *Application* 112
4.1.5 Point nodal et cheminements nodaux altimétriques 112
4.1.6 Cheminement fermé 113
4.1.7 Nivellement simultané d'un cheminement et de points de détail 115
4.1.8 Précision 116
4.1.8.1 *Erreurs parasites* 116
4.1.8.2 *Erreurs systématiques* 117
4.1.8.3 *Erreurs accidentelles* 118
4.1.8.4 *Écart-type* 118
4.1.8.5 *Vérification et réglage de la collimation* 118

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

5.2.1.2 Normalisation des relations d'observation 139
5.2.1.3 Résolution du système d'équations normalisées 141
5.2.2 Transformation d'Helmert 141
5.2.3 Calcul en bloc 142

5.3 Canevas polygonal 142
5.3.1 Cheminements planimétriques 142
5.3.2 Cheminement ouvert 143
5.3.2.1 *Observations* 143
5.3.2.2 *Calculs* 144
5.3.3 Cheminement encadré 148
5.3.3.1 *Observations* 148
5.3.3.2 *Calculs* 148
5.3.4 Localisation des erreurs parasites 154
5.3.4.1 *Erreur parasite d'observation sur un angle* 154
5.3.4.2 *Erreur parasite d'observation sur une distance* 156
5.3.4.3 *Erreurs simultanées d'angles ou de distances* 156
5.3.5 Point nodal et cheminements nodaux planimétriques 157
5.3.5.1 *Observations* 157
5.3.5.2 *Calculs* 158
5.3.5.3 *Points nodaux multiples* 160
5.3.6 Cheminement fermé 161
5.3.6.1 *L'orientation et les coordonnées à l'origine sont connues* 161
5.3.6.2 *Orientation sommaire, origine inconnue* 162
5.3.6.3 *Origine inconnue, orientation du premier côté strictement imposée* 163
5.3.7 Canevas de polygonation 163
5.3.7.1 *Cheminements principaux et cheminements secondaires* 163
5.3.7.2 *Désignation et matérialisation* 164
5.3.8 Observations et calculs 165
5.3.9 Centrage forcé 165

Chapitre 6. Positionnement satellitaire 167

6.1 Introduction 167

6.2 Rappel sur les réseaux géodésiques 168

6.3 Composition du système 168
6.3.1 Le secteur Espace 168
6.3.1.1 *NAVSTAR GPS* 168
6.3.1.2 *GLONASS* 169
6.3.1.3 *GALILEO* 169

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

6.12 Qualité des mesures 193
6.12.1 DOP 193
6.12.2 Redondance 194
6.12.3 Temps d'observation 195

6.13 Post-traitement des observations 195
6.13.1 Transfert des données 195
6.13.2 Calcul et validation des lignes de base 196
6.13.2.1 *Choix du point fondamental* 196
6.13.2.2 *Choix et calcul des vecteurs* 196
6.13.3 Ajustement 197
6.13.4 Adaptation 197

Chapitre 7. Levé des détails et implantations 199

7.1 Levé des détails planimétriques 199
7.1.1 Points à lever 199
7.1.2 Reconnaissance 200
7.1.3 Techniques de levé 201
7.1.3.1 *Limites et points* 201
7.1.3.2 *Abscisses et ordonnées* 202
7.1.3.3 *Multilatération des détails* 206
7.1.3.4 *Rayonnement* 206
7.1.4. Saisie des données 207
7.1.5 Nuage de points 3D par scanner 210

7.2 Levé du relief 211
7.2.1 Lignes caractéristiques et semis de points 211
7.2.2 Balayage et quadrillage 213
7.2.3 Profils 213

7.3 Tachéométrie 214
7.3.1 Instruments 214
7.3.2 Méthodologie 218
7.3.3 Observations 219
7.3.4 Enregistrement 222
7.3.5 Géocodification 223

7.4 Implantations 224
7.4.1 Caractères généraux 224
7.4.2 Alignements 224
7.4.2.1 *Points alignés* 224
7.4.2.2 *Parallèle à un mur* 225

7.4.3 Arcs de cercle tangents à des alignements droits 226
7.4.3.1 *Points de tangence* 226
7.4.3.2 *Abscisses et ordonnées* 227
7.4.3.3 *Implantation polaire* 229
7.4.3.4 *Intersection* 230
7.4.3.5 *Raccordement circulaire double* 231
7.4.4 Clothoïde 232
7.4.4.1 *Caractéristiques géométriques et formules* 232
7.4.4.2 *Calculs des éléments d'implantation* 233
7.4.5 Piquetage planimétrique 235
7.4.6 Repères altimétriques 236
7.4.7 Chronologie des travaux d'implantation 237

Chapitre 8. Travaux topographiques spécifiques 241

8.1 Bâtiment 241
8.1.1 Levé d'intérieur 241
8.1.1.1 *Saisie manuelle* 241
8.1.1.2 *Chaîne numérique* 243
8.1.2 Levé des façades 243
8.1.3 Contrôles de verticalité 244
8.1.3.1 *Piliers et poteaux* 244
8.1.3.2 *Façades planes* 245
8.1.4 Chaises 245
8.1.5 Le GPS dans le monde de la construction 245

8.2 Travaux publics 246
8.2.1 Entrées en terre et gabarits de talutage 246
8.2.2 Localisation et guidage des engins de chantier 248

8.3 Topographie souterraine 249
8.3.1 Transfert au fond des canevas du jour 249
8.3.2 Creusement d'une galerie 251
8.3.3 Contrôle des profils en travers 252

8.4 Métrologie 252
8.4.1 Métrologie géodésique 252
8.4.1.1 *Autocollimation* 253
8.4.1.2 *Rayonnement spatial* 254
8.4.1.3 *Intersection spatiale* 254
8.4.1.4 *Nivellement géométrique de très haute précision* 255
8.4.2 Métrologie photogrammétrique 255
8.4.3 Auscultation d'ouvrage 256

8.5 Photogrammétrie 256
8.5.1 Prise de vue et clichés 256
8.5.2 Photo-interprétation 258
8.5.3 Stéréophotogrammétrie 258

8.6 Bathymétrie 261

8.7 SIG 262
8.7.1 Les données d'un SIG 262
8.7.2 Les utilisations d'un SIG 263
8.7.3 Architecture et fonctionnalités 263
8.7.4 Modélisation et articulation des données 265
8.7.5 Les sources de données 265

Chapitre 9. Calculs topométriques 267

9.1 Modes de calcul 267
9.1.1 Rappels mathématiques 267
9.1.1.1 *Trigonométrie circulaire* 267
9.1.1.2 *Équation du second degré* 271
9.1.1.3 *Développements limités* 271
9.1.1.4 *Dérivées et différentielles* 271
9.1.1.5 *Géométrie* 273
9.1.2 Calcul séquentiel 275
9.1.3 Traitement informatique 278

9.2 Coordonnées 278
9.2.1 Conversions 278
9.2.1.1 *Conversion des coordonnées polaires en coordonnées rectangulaires* (P → R) 278
9.2.1.2 *Conversion des coordonnées rectangulaires en coordonnées polaires* (R → P) 279
9.2.1.3 *Application* 280
9.2.1.4 *Distance d'un point à une droite* 282
9.2.2 G0 de station 282
9.2.3 Stations excentrées 284
9.2.4 Rattachement – rabattement 286
9.2.5 Changement de repère orthonormé 287
9.2.5.1 *Angle des repères* 287
9.2.5.2 *Formules* 288
9.2.5.3 *Algorithme* 289
9.2.5.4 Application 291

9.3 Intersections de droites et de cercles 293
9.3.1 Intersection de deux visées 293
9.3.2 Intersection de deux droites 294
9.3.3 Intersection de deux cercles 296
9.3.4 Centre et rayon d'un cercle défini par les coordonnées de trois de ses points 297
9.3.5 Relèvement sur trois points 297
9.3.5.1 *Intersection des arcs capables* 298
9.3.5.2 *Relèvement italien* 301
9.3.5.3 *Formule de Delambre* 302
9.3.6 Relèvement double 303
9.3.7 Intersection d'une droite et d'un cercle 304
9.3.8 Intersection d'une visée et d'un arc capable 305

9.4 Superficies 305
9.4.1 Superficies graphiques 305
9.4.1.1 *Décomposition d'un polygone en triangles et en trapèzes* 305
9.4.1.2 *Surfaces à limites sinueuses* 306
9.4.1.3 *Planimètres* 306
9.4.1.4 *Surfaces digitalisées* 309
9.4.1.5 *Jeu du papier* 310
9.4.2 Superficies numériques élémentaires 312
9.4.2.1 *Triangles* 312
9.4.2.2 *Trapèzes* 314
9.4.2.3 *Quadrilatères* 316
9.4.2.4 *Secteur et segment circulaires* 317
9.4.3 Superficie d'un polygone défini en coordonnées polaires 317
9.4.4 Superficie d'un polygone défini en coordonnées rectangulaires 319
9.4.4.1 *Superficie positive* 319
9.4.4.2 *Superficie négative* 320
9.4.4.3 *Polygone quelconque* 320
9.4.5 Formule polygonale ou formule de Sarron 322
9.4.5.1 Notations 322
9.4.5.2 Formule 322
9.4.5.3 Calcul direct du côté inconnu 325
9.4.5.4 Calcul des angles inconnus 326
9.4.5.5 Arrondis et troncatures 327
9.4.6 Redressement des limites 327
9.4.6.1 Segment de redressement 327
9.4.6.2 Ligne brisée 328

9.5 Divisions des surfaces 330
9.5.1 Triangles 330

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

10.3 Plans numérisés 387

10.4 Présentation 388

10.4.1 Formats 388
10.4.2 Habillage 389
10.4.3 Indications 389
10.4.4 Exemples 390

Index 393

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

1.1.2 Les calculs topométriques

Ils traitent numériquement les observations d'angles, de distances et de dénivelées, pour fournir les *coordonnées rectangulaires* planes : abscisse E, ordonnée N et les *altitudes* H des points du terrain, ainsi que les *superficies* ; en retour, les calculs topométriques exploitent ces valeurs pour déterminer les angles, distances, dénivelées non mesurées, afin de permettre notamment les implantations.

1.1.3 Les dessins topographiques

L'*échelle* (E) d'un plan ou d'une carte est le rapport constant entre une distance mesurée sur le papier (P) et la distance homologue du terrain (T) : $\frac{P}{T} = \frac{1}{E}$.

On distingue trois types d'échelles :

- petite échelle : 100 000 ≤ E ;
- moyenne échelle : 10 000 ≤ E ≤ 100 000 ;
- grande échelle : E < 10 000, en général $\frac{1}{5\,000}$, $\frac{1}{2\,000}$, $\frac{1}{1\,000}$, l'appellation « très grande échelle » s'appliquant plutôt au $\frac{1}{500}$, $\frac{1}{200}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{50}$.

Un dessin topographique est la représentation conventionnelle du terrain à grande échelle.
Selon le mode de saisie des données et le mode de traitement numérique et graphique mis en œuvre, on peut distinguer trois types de plans :

- le *plan graphique,* représentation obtenue en reportant les divers éléments descriptifs du terrain sur un support approprié quel que soit le mode d'établissement. Établi par « dessin au trait », sa précision d'exploitation est au mieux de 0,1 mm, valeur qui conditionne en amont la précision des observations (à l'échelle 1/1 000, les dimensions du terrain inférieures à 10 cm ne peuvent être représentées) et en aval leur exploitation (à l'échelle 1/1 000, il est illusoire d'espérer évaluer une distance terrain à mieux que le décimètre) ;
- le *plan numérique* est le fichier informatique des coordonnées des points et des éléments descriptifs du terrain, quel que soit le mode d'établissement ; ce fichier autorise le dessin du plan à différentes échelles à l'aide de traceurs de dessin assisté par ordinateur (DAO), la précision, *indépendante de l'échelle*, étant au mieux celle de la saisie des données ;
- le *plan numérisé* est un plan numérique dont une partie des données provient d'un plan graphique.

L'appellation *plan topographique* s'applique généralement au plan qui représente les éléments planimétriques apparents, naturels ou artificiels, du terrain et porte la représentation conventionnelle de l'altimétrie.

1.1.4 Projets d'aménagement

Ce sont les projets qui modifient la planimétrie et l'altimétrie d'un terrain : aménagements fonciers comme le remembrement avec les travaux connexes, lotissements avec l'étude de voirie et réseaux divers (VRD), tracés routiers et ferroviaires, gestion des eaux : drainage, irrigation, canaux, fossés, etc.

1.1.5 Implantations

Les projets d'aménagement sont des « produits intellectuels », établis généralement à partir de données topographiques, qui doivent être réalisés sur le terrain. Pour ce faire, le topographe implante, autrement dit met en place sur le terrain, les éléments planimétriques et altimétriques nécessaires à cette réalisation.

1.1.6 Suivi et contrôle des ouvrages

Les ouvrages d'art une fois construits demandent souvent un suivi, c'est-à-dire une *auscultation*, à intervalles de temps plus ou moins réguliers suivant leur destination : digues, ponts, affaissements, etc. Les travaux topographiques correspondants débouchent généralement sur les mesures des variations des coordonnées ENH de points rigoureusement définis, suivies de traitements numériques divers constatant un état et éventuellement prévoyant une évolution.

Les travaux topographiques sont très informatisés, à la fois par des *progiciels*, programmes standards répondant à des besoins prédéfinis auxquels l'utilisateur doit s'adapter, et par des *logiciels* programmes spécifiques adaptés aux besoins propres de l'utilisateur.

1.2 Les systèmes de coordonnées

1.2.1 Coordonnées cartésiennes géocentriques X, Y, Z

La géodésie tridimensionnelle résout les problèmes de la représentation de la Terre, sans intervention d'hypothèse concernant sa forme, en utilisant un système à trois dimensions défini par un trièdre trirectangle, à coordonnées cartésiennes appelées *géocentriques*.

Le référentiel terrestre est un référentiel orthonormé direct dont l'origine est le centre d'inertie O de la Terre (figure 1.1), le plan OXY le plan de l'équateur, le plan OXZ le plan du méridien de Greenwich ; l'axe OZ est confondu avec l'axe de rotation de la Terre.

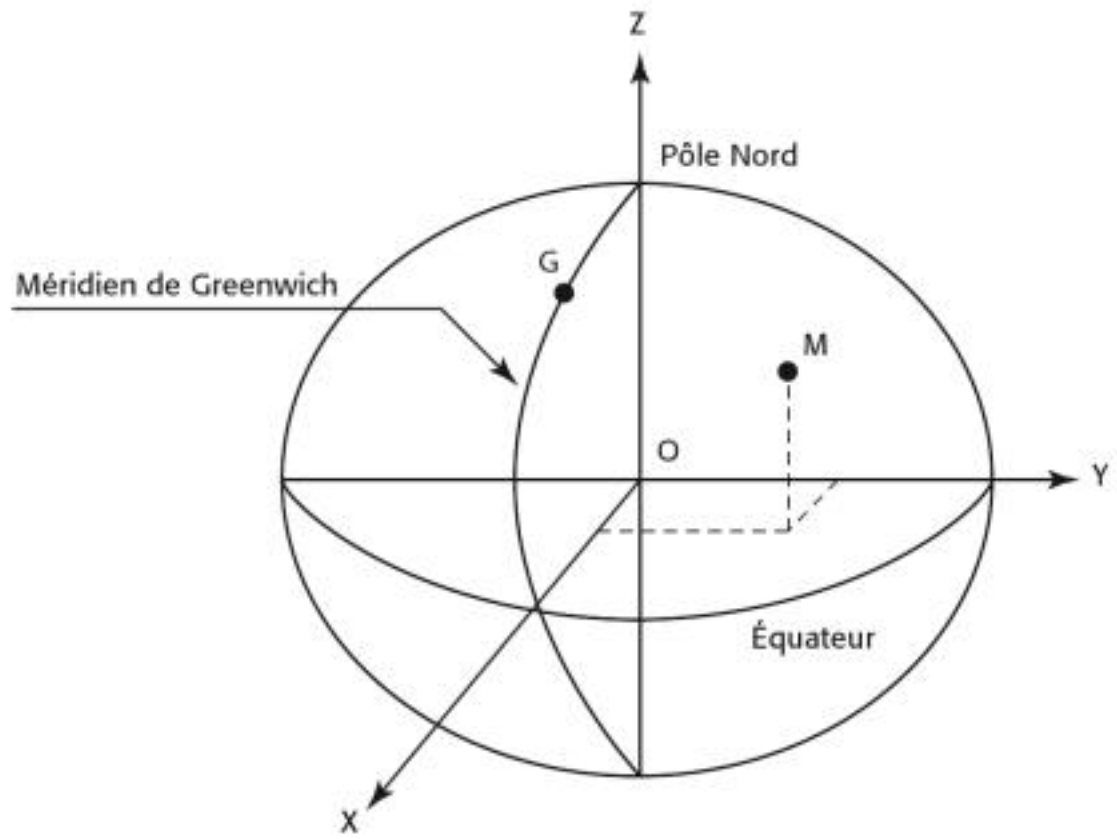


Figure 1.1. Coordonnées géocentriques.

1.2.2 Coordonnées géographiques λ, ϕ, h

La *surface topographique*, limite entre la terre solide et l'atmosphère ou les océans, est, à une dizaine de kilomètres près, proche d'un volume mathématique connu : l'*ellipsoïde* de révolution, volume engendré par une ellipse tournant autour de son petit axe (figure 1.2).

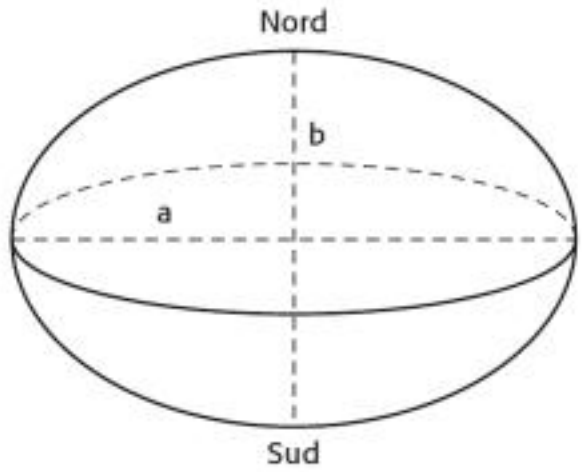


Figure 1.2. Ellipsoïde.

Il est défini par la valeur du demi-grand axe a et du demi-petit axe b ou l'inverse de l'aplatissement valant $\frac{1}{f} = \frac{a-b}{a}$.

Plusieurs ellipsoïdes existent, suivant le système géodésique auquel ils sont associés. Le RGF93 (Réseau géodésique français, commencé en 1993), réseau légal de référence depuis le 1er février 2001 (décret du 26 décembre 2000) pour les superficies supérieures à 10 000 m² ou dont la plus grande longueur excède 500 m, s'appuie sur l'ellipsoïde international *AIG-GRS 80* (Association internationale de géodésie, *Geodetic Reference System*, adopté en 1980).

La Nouvelle Triangulation de la France (NTF), en vigueur jusqu'au 31 janvier 2001, utilisait comme ellipsoïde de référence l'ellipsoïde de Clarke 1880 de l'Institut géographique national.

Le *méridien* géodésique d'un point est le plan contenant le lieu et le petit axe de l'ellipsoïde de référence ; par extension, c'est son intersection avec l'ellipsoïde (figure 1.3).

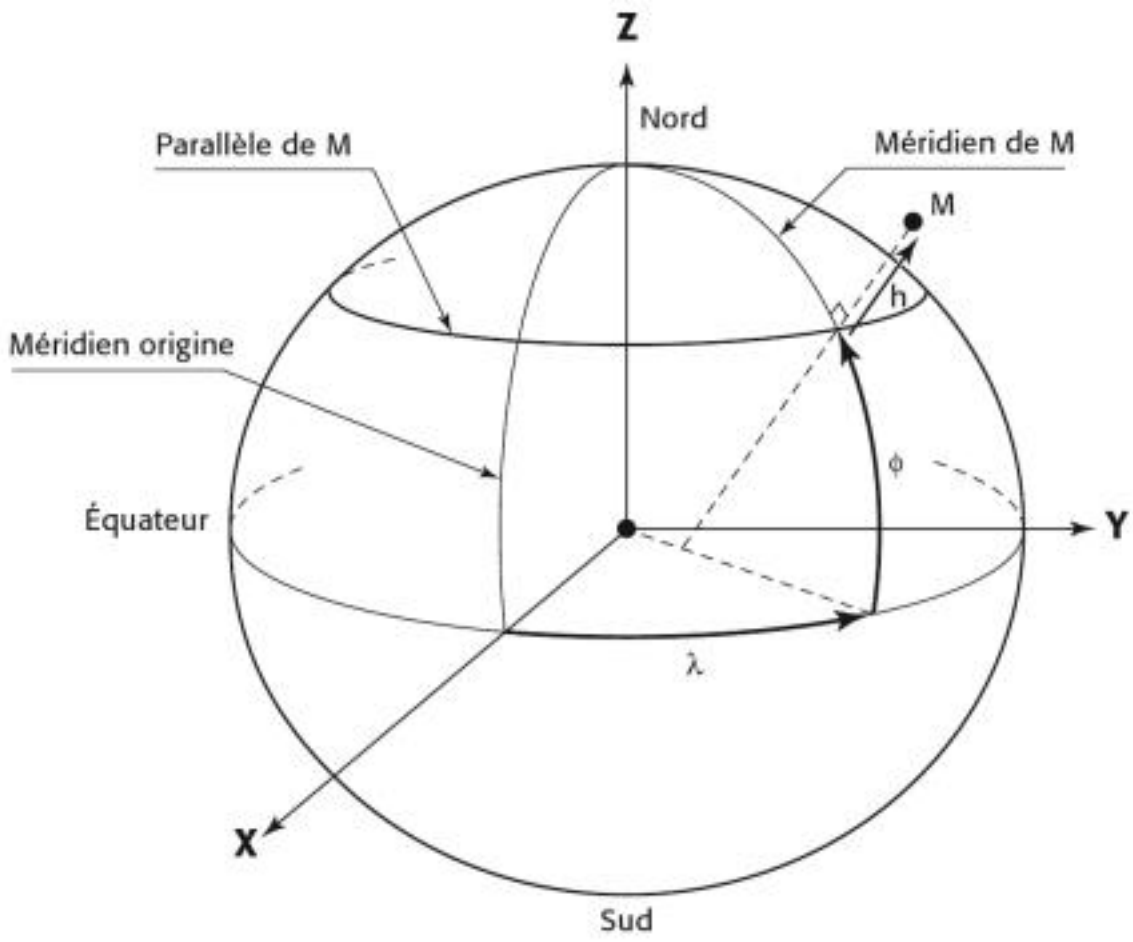


Figure 1.3. Coordonnées géographiques.

Le *parallèle* d'un point est le cercle intersection de l'ellipsoïde avec le plan perpendiculaire à l'axe des pôles contenant le point.
Les *coordonnées géographiques* d'un point M, qui permettent de le positionner, sont :

- la *longitude géodésique* λ, angle du méridien du lieu avec le méridien origine ;
- la *latitude géodésique* φ est l'angle que fait la normale en un point à l'ellipsoïde avec le plan de *l'équateur*, ce dernier étant le plus grand cercle de l'ellipsoïde dont le plan est perpendiculaire à la ligne des pôles ;
- la *hauteur ellipsoïdale h*, hauteur entre le point et le pied de la normale à l'ellipsoïde.

Les longitudes sont comptées en degrés sexagésimaux ou en grades, à l'est ou à l'ouest du méridien origine, lequel dépend du système géodésique utilisé. Il s'agit du méridien international de Greenwich pour le RGF93 et de celui de l'Observatoire de Paris pour l'ancienne NTF. La longitude de ce dernier par rapport au méridien international est de 2°20'14.02500".

Réseau géodésique	Ellipsoïde	a (m)	b (m)	1/f	Méridien origine	Unités
RGF93	AIG-GRS 80	6 378 137	6 356 752.314	298.257222101	Greenwich	° ' "
NTF	Clarke 1880	6 378 249.2	6 356 515.0	293.4660208	Paris	gon

1.2.3 Coordonnées planes E, N

1.2.3.1 Systèmes de projection

Pour pallier l'inconvénient de coordonnées en unités d'angle, on utilise les coordonnées planes ou rectangulaires en mètres. Elles sont obtenues par un système de projection, établissant une correspondance entre un point de l'ellipsoïde et ses coordonnées géographiques λ et φ avec les coordonnées planes rectangulaires E, N de ce même point dans le repère orthonormé de la projection. Les principaux systèmes sont coniques ou cylindriques : l'ellipsoïde est projeté sur un cône ou un cylindre tangent à l'ellipsoïde le long d'un méridien ou d'un parallèle (figure 1.4).

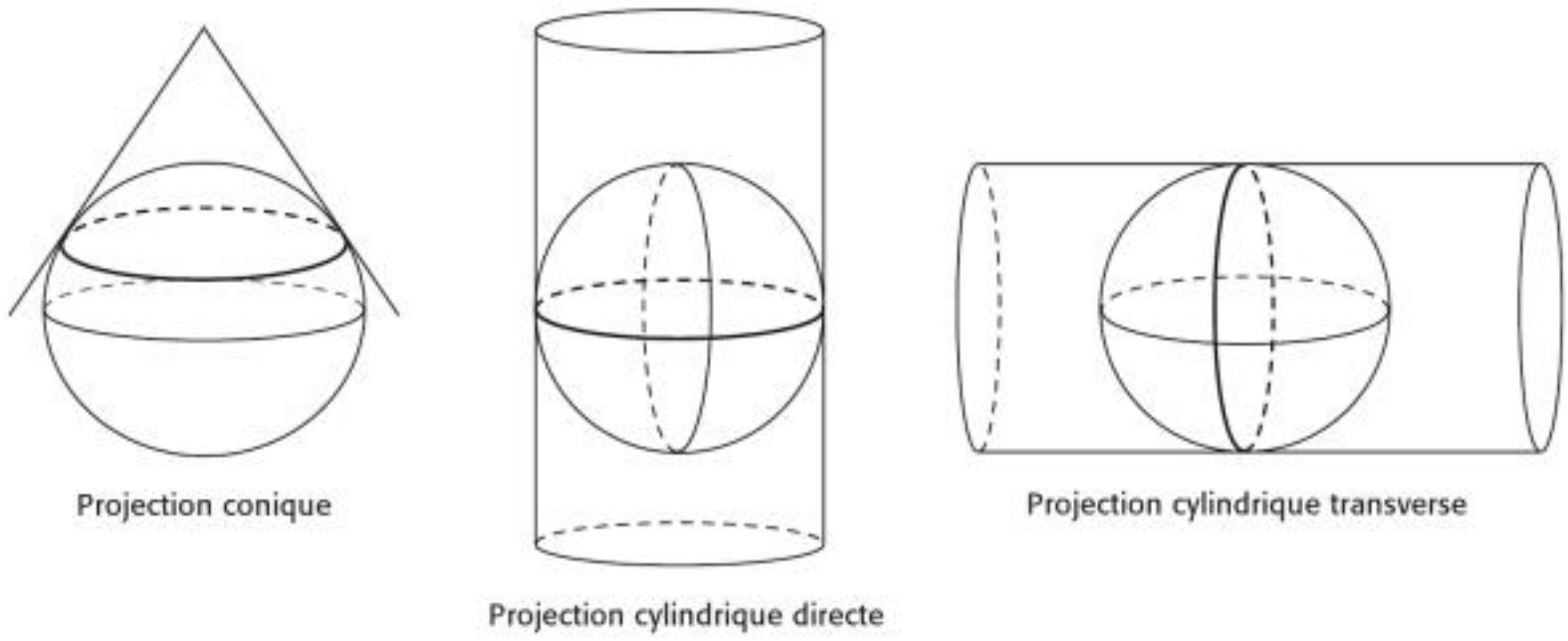


Figure 1.4. Projections conique et cylindrique.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Afin de limiter l'altération linéaire pour les zones éloignées du parallèle origine, on utilise trois systèmes : Lambert I ou Nord, II ou Centre, III ou Sud pour l'Hexagone (figure 1.6) et un quatrième pour la Corse, ayant comme parallèles origines respectifs ceux de latitudes 55 gon, 52 gon, 49 gon et 46,85 gon ; en outre, pour limiter encore plus les déformations, on applique un facteur d'échelle à ces projections tangentes : chaque zone a donc deux parallèles d'échelle conservée ϕ_1 et ϕ_2, ou parallèles de déformation linéaire nulle (comme si le cône était sécant à l'ellipsoïde). L'altération linéaire maximum est ainsi de 25 cm/km soit 250 ppm.

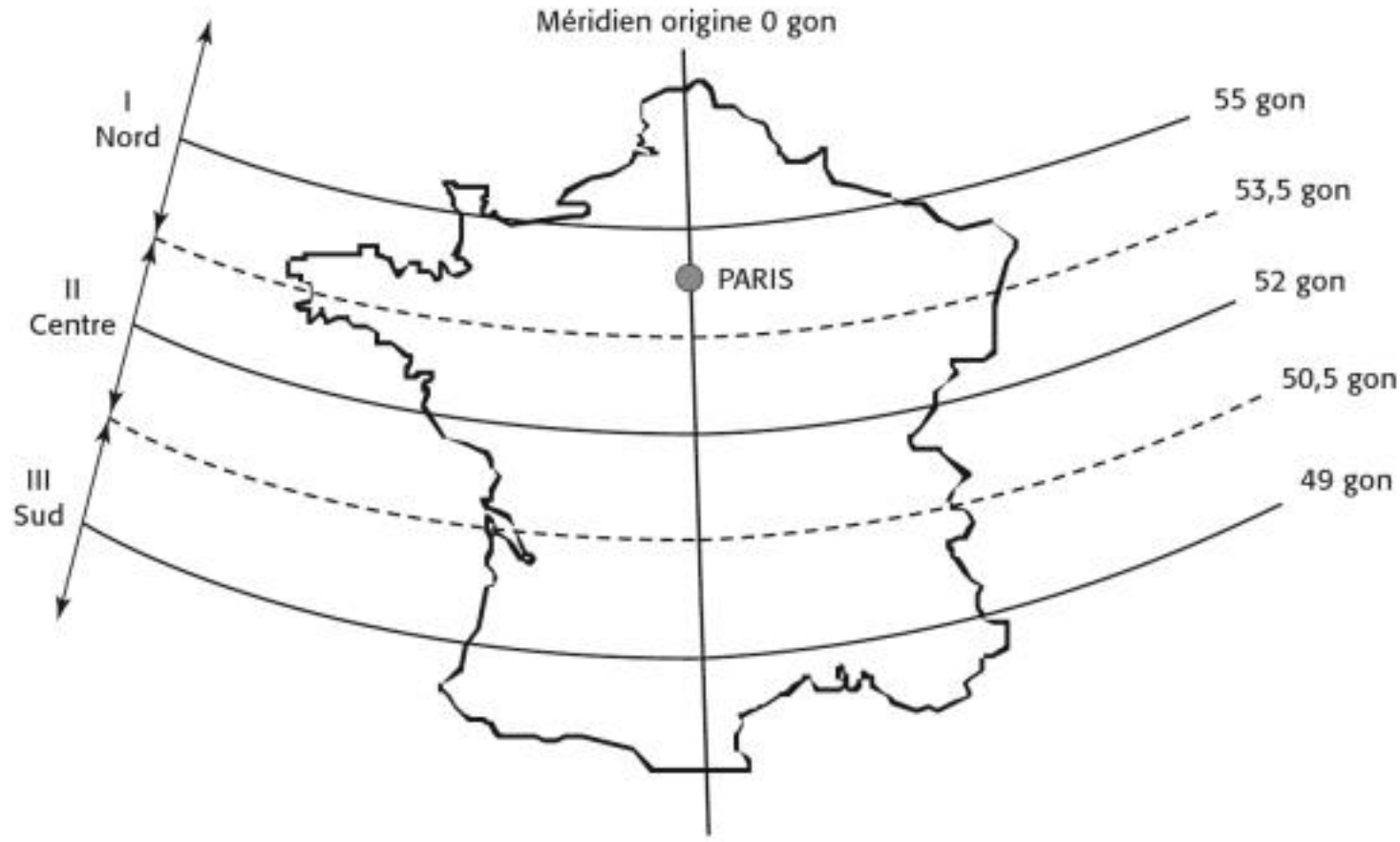


Figure 1.6. Lambert I, II, III.

Pour le territoire métropolitain, les intersections du méridien de Paris avec les parallèles centraux sont les origines des quadrillages respectifs I, II, III ; de manière à supprimer les coordonnées négatives et à identifier clairement le Lambert concerné, ces origines ont été affectées des coordonnées suivantes :

Lambert I	E_0 = 600 000 m	N_0 = 1 200 000 m
Lambert II	E_0 = 600 000 m	N_0 = 2 200 000 m
Lambert III	E_0 = 600 000 m	N_0 = 3 200 000 m

Afin de pallier, pour certains usages, les inconvénients indéniables de la division du territoire en quatre zones Lambert, il a été décidé en 1973 d'adopter un quadrillage unique qui ne se substitue pas aux autres mais s'y ajoute. Le système Lambert II étendu est l'extension du Lambert II à l'ensemble du territoire métropolitain et à la Corse. Dans les zones I, III, IV, il coexiste avec le système local, car seul le quadrillage est étendu, chaque zone conservant sa projection ; les altérations linéaires sont évidemment importantes aux extrêmes Nord et Sud, de l'ordre du mètre par kilomètre.

Exemple

Le point du RBF (Réseau de base français) de Villers-lès-Nancy 5457802 a pour coordonnées (transformées) Lambert 1 : E = 878 960,80 m et N = 1 113 287,34 m.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

1.2.3.6 Paramètres des différents systèmes

Système géodésique	Projection	Ellipsoïde associé	Méridien central de la projection λ_0	Parallèle origine ϕ_0	Parallèle d'échelle conservée ϕ_1 ϕ_2	Facteur d'échelle k_0	E_0 (km)	N_0 (km)
NTF	Lambert I	Clarke 1880	Paris	55 gon	48°35′54,682″ 50°23′45,282″	0.99987734	600	1 200
NTF	Lambert II	Clarke 1880	Paris	52 gon	45°53′56,108″ 47°41′45,652″	0.99987742	600	2 200
NTF	Lambert III	Clarke 1880	Paris	49 gon	43°11′57,449″ 44°59′45,938″	0.99987750	600	3 200
NTF	Lambert IV	Clarke 1880	Paris	46,85 gon	41°33′37,396″ 42°46′03,588″	0.99994471	234,358	185,862
RGF93	Lambert 93	AIG GRS80	3° Est Greenwich	46°30' N	44° N 49 °N	0.99905103	700	6 600
RGF93	CCxx zone	AIG GRS80	3° Est Greenwich	xx° N	xx+/- 0,75°		1 700	N°Z+200
ED50	UTM	Hayford	Fuseau 31 3° Est Greenwich	0°	/	0.9996	500	0 (Nord) 10 000 (Sud)

Tous les systèmes de projection déformant les longueurs, les logiciels de traitement numérique corrigent les altérations linéaires correspondantes.

De même, l'orientation observée d'une direction est modifiée par la correction de dV : angle entre la géodésique, courbe image de la visée dans le système de projection et la droite joignant les extrémités.

1.2.4 Transformation de coordonnées

1.2.4.1 Coordonnées géographiques λ, $\phi \Leftrightarrow$ planes E, N

Les formules sont spécifiques à chaque projection. Pour les Lambert Zone par exemple, l'algorithme de transformation directe $\lambda, \phi \Rightarrow E, N$ est le suivant :

- excentricité : $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} = \sqrt{\frac{a-b}{a}\left(2 - \frac{a-b}{a}\right)}$;
- grande normale du parallèle origine :

$$N_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - (e \cdot \sin\varphi_0)^2}} ;$$

  avec φ_0 latitude du parallèle origine ;
- rayon du parallèle origine dans la projection : $R_0 = \frac{k_0 \cdot N_0}{\tan\varphi_0}$; k_0 facteur d'échelle de la projection ;
- latitude isométrique L_0 du parallèle origine de latitude φ_0 qui traduit la conformité de la projection :

$$L_0 = \ln\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right) - \frac{e}{2} \cdot \ln\frac{1 + e \cdot \sin\varphi_0}{1 - e \cdot \sin\varphi_0} ;$$

- constante : $C = R_0 \,.\, \exp(L_0 \,.\, \sin\varphi_0)$, avec exp notation de l'exponentielle néperienne ;
- latitude isométrique L pour la latitude φ :

$$L = \ln\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - \frac{e}{2} \cdot \ln\frac{1 + e \cdot \sin\varphi}{1 - e \cdot \sin\varphi} ;$$

– $R = C \cdot \exp(-L \cdot \sin \varphi_0)$;

– coordonnées Lambert : $E = E_0 + R \cdot \sin \gamma$, $N = N_0 + R_0 - R \cdot \cos \gamma$

Exemple

À Nancy, le point de coordonnées géographiques $\lambda = 6°11'35''$ Est Greenwich et $\phi = 48°41'29''$ Nord a pour coordonnées planes Lambert 1 : E = 883 759,82 m et N = 1 117 342,99 m.

La transformation inverse E, N ⇒ λ, ϕ est calculée par les formules :

$$\gamma = \arctan\left(\frac{E - E_0}{R_0 - (N - N_0)}\right);$$

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\gamma}{\sin \varphi_0};$$

$$R = \sqrt{(E - E_0)^2 + [R_0 - (N - N_0)]^2};$$

$$L = -\frac{1}{\sin \varphi_0} \cdot \ln \frac{R}{C};$$

$$L - \ln \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + \frac{e}{2} \cdot \ln \frac{1 + e \cdot \sin \varphi}{1 - e \cdot \sin \varphi} = 0,$$

équation résolue par calculs itératifs (§ 9.6).

En pratique, ces transformations sont traitées en calcul automatique par logiciels.

1.2.4.2 Changement de système géodésique

Le passage de coordonnées d'un système géodésique à un autre se fait suivant le schéma de la figure 1.9 :

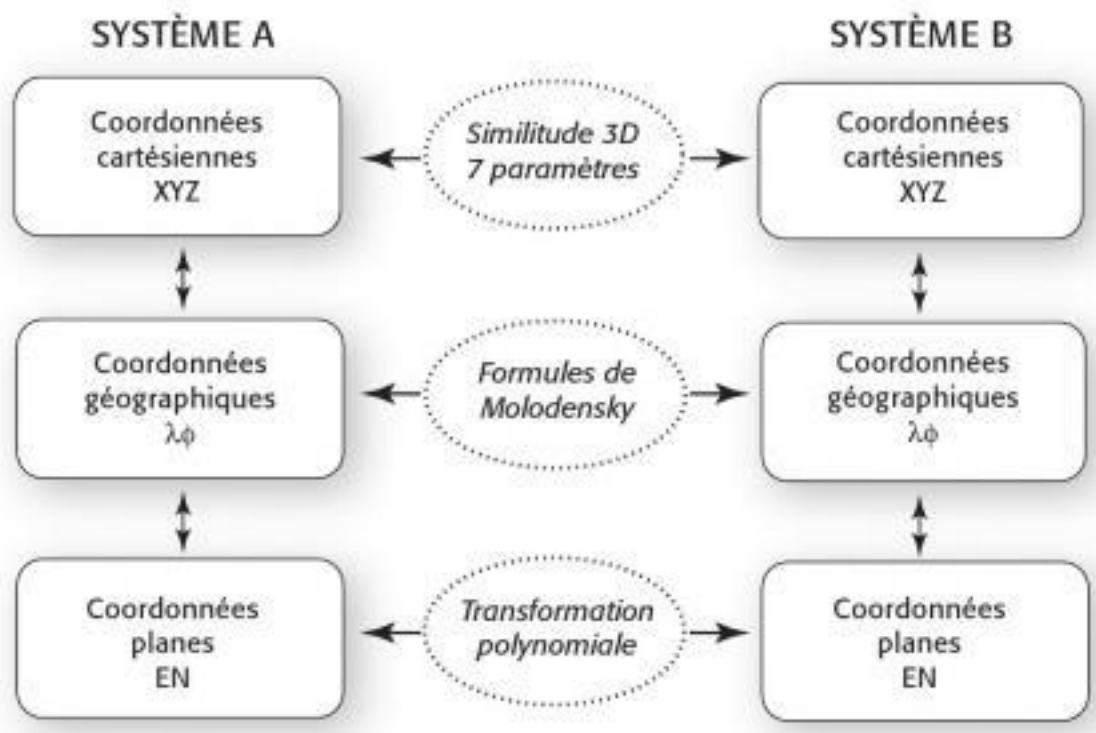


Figure 1.9. Transformation de coordonnées.

Document IGN

Les formules de Molodensky nécessitant des formules différentes pour les deux sens de passage et la transformation polynomiale ne pouvant s'appliquer que sur une zone limitée pour conserver la précision, c'est en pratique la similitude 3D la méthode de transformation de coordonnées la plus utilisée.

Elle est composée d'une translation T (déplacement du centre du premier repère vers le second), d'une rotation, amenant les axes du premier repère parallèles à ceux du second et d'une homothétie, soit 7 paramètres :

- T_X, T_Y, T_Z de translation ;
- ε_X, ε_Y, ε_Z de rotation ;
- k, facteur d'échelle.

Les coordonnées d'un point dans le système B seront alors calculées par la formule suivante :

$$\begin{pmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + k \cdot \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 0 & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix}$$

Pour le cas particulier d'un passage de la NTF vers le RGF93, la transformation se fait au moyen d'une grille de paramètres, appelée *GR3D97A*. Cette grille au format ASCII fournit les paramètres de translation T_X, T_Y, T_Z par interpolation à partir d'un semis de points espacés de 0,1° en longitude et en latitude. Aucune rotation ou changement d'échelle n'ont en effet été mis en évidence. Ces 3 valeurs correspondent donc aux coordonnées de l'origine de la NTF dans le RGF93. La précision de cette transformation-grille est en moyenne de 5 cm.

L'IGN met à disposition gratuitement des outils de conversion de coordonnées ; CIRCE est un logiciel permettant de réaliser la plupart des transformations utiles en France : il est possible d'obtenir des coordonnées planes (Lambert Zone, 93, CC 9 zones, UTM…) et des coordonnées géographiques dans les différents systèmes : NTF, RGF93, ED50, WGS84. L'opération est réalisée sur un point ou un fichier de points. IGNMap permet également un changement de système de coordonnées pour des données raster et vecteurs.

1.3 Systèmes géodésiques

Un système géodésique a pour but de localiser un point dans un référentiel géodésique défini par un repère affine dont le centre est proche du centre des masses de la Terre (§ 1.2.1). L'ensemble des points connus (bornes, clochers, antennes…) dans ce système géodésique forme alors un réseau géodésique.

On distingue les systèmes terrestres, obtenus par triangulation, consistant à mesurer les angles des triangles et quelques distances pour la mise à l'échelle et les systèmes spatiaux, tridimensionnels et géocentriques, obtenus par géodésie spatiale. De nombreux systèmes existent suivant les pays, les règlements, l'amélioration des techniques et leur compatibilité.

1.3.1 Les systèmes terrestres

1.3.1.1 La Nouvelle Triangulation de la France

La NTF, achevée en 1991, a matérialisé le système géodésique de référence légal jusqu'au 31 janvier 2001 ; elle a succédé à la Triangulation des ingénieurs géographes datant du XIXe siècle, qui elle-même remplaçait celle des Cassini réalisée au XVIIIe siècle. Compte tenu de la durée de réalisation de la NTF, des techniques d'observation et des moyens de calcul de l'époque, les coordonnées des sommets des triangles qui la composent ont été déterminées

selon un ordre chronologique : triangles de chaînes puis triangles complémentaires dits de premier ordre, complétés par des triangles intérieurs fournissant les points de deuxième ordre et ainsi de suite jusqu'au quatrième ordre inclus.

En définitive, la NTF comptait environ 70 000 points répartis sur tout le territoire, soit une densité de l'ordre de 1 point pour 7 km², la précision relative moyenne entre deux points voisins étant égale à 10^{-5}. Des points dits de cinquième ordre, ou de triangulation complémentaire, se sont ajoutés parfois aux précédents, qui amènent le nombre total à plus de 80 000 points.

L'approximation de l'altitude est le décimètre ou le centimètre selon la nature du point et le mode de nivellement.

Les principales caractéristiques de la NTF sont :

- réalisation bidimensionnelle obtenue par triangulation et mise à l'échelle ;
- utilisation de l'ellipsoïde de Clarke 1880 ;
- méridien origine : Paris, unité : grade ;
- projections associées : Lambert I, II, III et IV.

Les fiches signalétiques de certains points de la NTF (figure 1.10) sont diffusées gratuitement par l'IGN sur le géoportail (www.geoportail.fr) en affichant la couche *sites géodésiques* et *réseau de détail*. Elles fournissent les coordonnées géographiques et planes *transformées* dans le RGF93 (§ 1.3.2.1).

1.3.1.2 ED50 (European Datum 1950)

Créé après la Seconde Guerre mondiale, il a été établi grâce aux observations terrestres des premier et deuxième ordres de pays de l'Europe occidentale afin d'éviter les incompatibilités aux frontières entre les systèmes nationaux.

Il utilise l'ellipsoïde de Hayford 1909 et la projection UTM. En 1987, des observations de géodésie spatiale ont été ajoutées pour obtenir l'ED87, aujourd'hui remplacé par l'ETRS89.

1.3.2 Les systèmes spatiaux

1.3.2.1 RGF93 (Réseau géodésique français 1993)

Créé à la suite des recommandations du Conseil national de l'information géographique (CNIG) et du développement du positionnement satellitaire, le système RGF93, géocentrique et tridimensionnel, de précision centimétrique, est la réalisation nationale du système européen ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*), lui-même cohérent avec le système mondial ITRS.

C'est un réseau géodésique nouveau par rapport aux réseaux qui l'ont précédé, en ce sens qu'il résulte des révolutions technologiques dans le positionnement satellitaire par GPS (*Global Positioning System*) comme dans les moyens de traitement informatique.

Il comprend trois niveaux hiérarchiques :

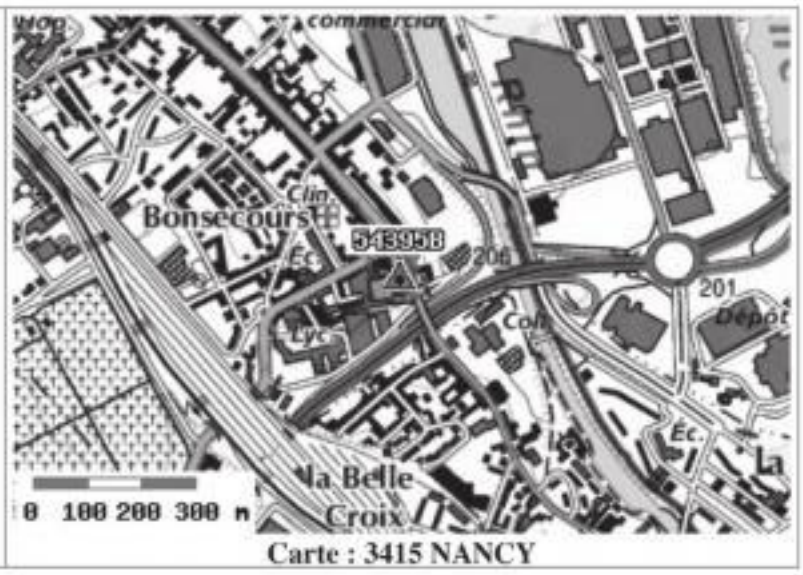
- le *Réseau de référence français (RRF)*, constitué de 23 sites répartis sur l'ensemble de la France métropolitaine, déterminés par GPS en 1993, de *précision centimétrique* dans le système de référence mondial ITRF93 (*International Earth Rotation Service Terrestrial Reference Frame*) ; référence nationale primaire aussi bien que réseau scientifique, la stabilité, le rattachement à des repères et les modalités de conservation physique sont particulièrement soignés ;

Réseau Géodésique Français

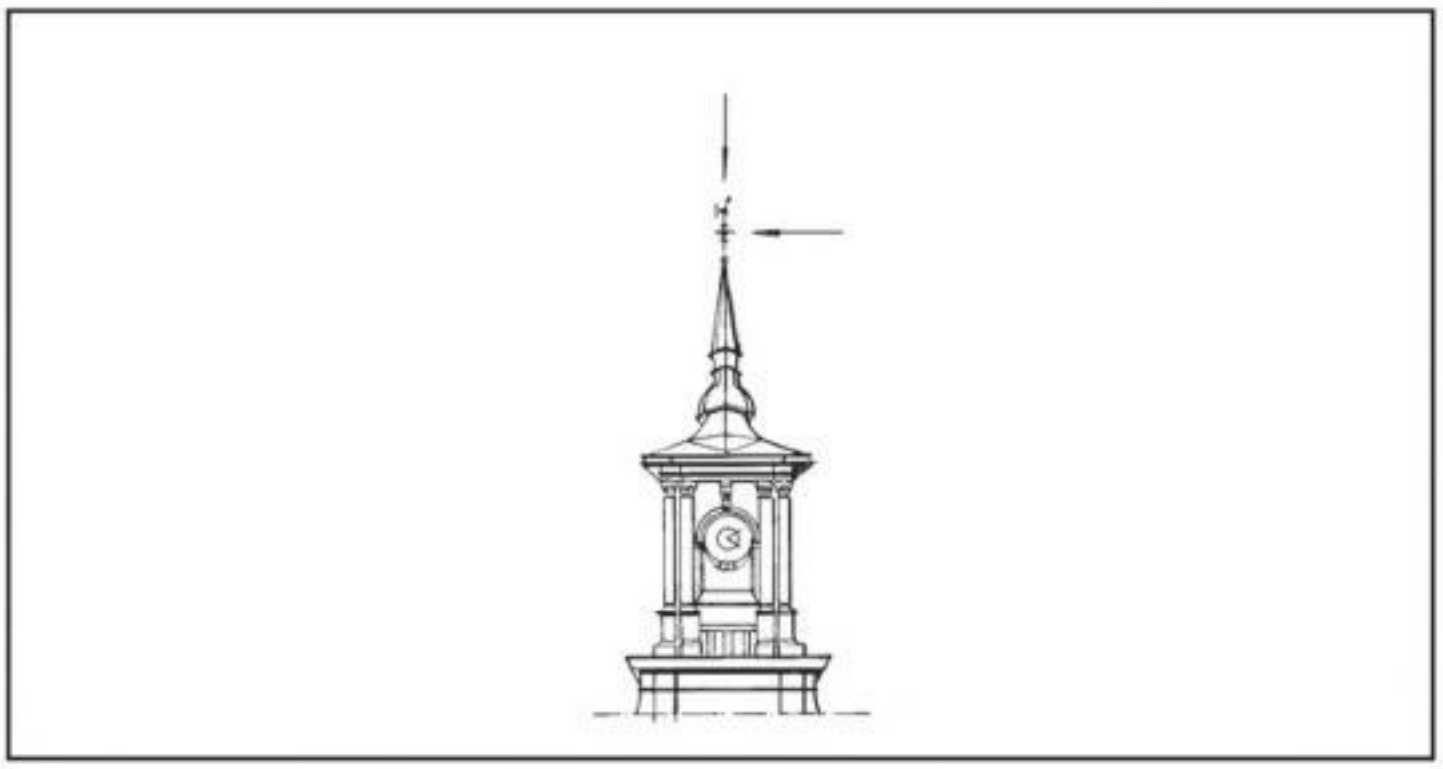
NANCY B

Département :	MEURTHE-ET-MOSELLE (54)	No du Site	**54395B**
Commune :	NANCY		
Lieu-dit :	Notre Dame de Bon Secours	Site	RDF

Azimut de la prise de vue : 201 gr



Carte : 3415 NANCY



Système : RGF93 - Ellipsoïde : IAG GRS 1980 - Méridien origine : GREENWICH

Point	Longitude (dms)	Latitude (dms)	Hauteur (m)	Précision
1	6° 11' 57.5746" E	48° 40' 36.1993" N	300.61	< 50 cm

Système : RGF93 - Projection : LAMBERT-93 - Système altimétrique : NGF-IGN 1969

Point	e (m)	n (m)	Précision plani	Altitude (m)	Précision alti
1	935492.44	6846611.72	< 10 cm	253.60	< 50 cm

Figure 1.10. Fiche signalétique NTF.

Document IGN

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

1.4 Les systèmes d'altitudes

1.4.1 Altitudes

Une surface de niveau est une surface équipotentielle de la pesanteur, normale à toutes les verticales : le travail à effectuer dans le champ de la pesanteur est donc constant (ce n'est pas une surface à g constant). Il serait donc logique de considérer que deux points d'une même équipotentielle ont la même altitude.

La surface équipotentielle choisie comme origine des altitudes est appelée *géoïde*. C'est une surface proche du niveau de la mer, irrégulière, inaccessible à l'observation et dont le modèle mathématique le plus proche est l'ellipsoïde.

L'espacement entre deux surfaces de niveau varie d'un endroit à l'autre selon les variations d'intensité du champ de la pesanteur.

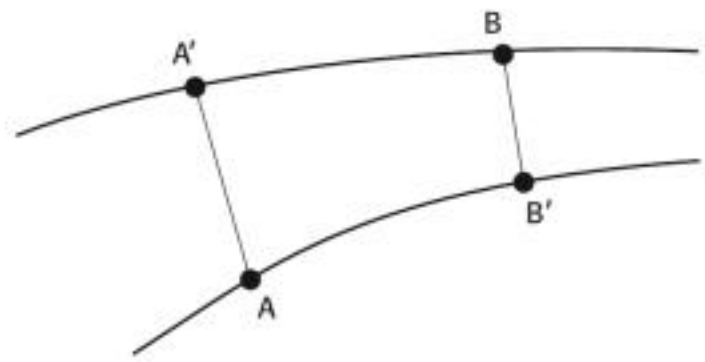


Figure 1.12. Surfaces équipotentielles.

Prenons l'exemple d'un nivellement entre A et B suivant deux itinéraires : A-A'-B et A-B'-B. La dénivelée entre A et B' ou A' et B étant nulle (même équipotentielle), la dénivelée AB vaut AA' dans le premier cas et B'B dans le second. Autrement dit, l'altitude de B dépendrait de l'itinéraire suivi.

Pour pallier cet inconvénient, on utilise la notion de *cote géopotentielle* : c'est le travail W à effectuer dans le champ de la pesanteur pour passer du géoïde (W_0) à la surface de niveau de B. Elle est égale à $W_{AB} = \int_A^B g \cdot d_h$, où dh est la dénivelée élémentaire. Ce travail est indépendant du trajet suivi.

Afin d'exprimer les altitudes sous la forme pratique de distances verticales au géoïde, on divise la cote géopotentielle par une valeur de g. Selon la valeur de g choisie, on obtient plusieurs types d'altitude : *orthométrique* (valeur de g théorique) ou *normale* (valeur de g réelle).

1.4.2 Réseaux de nivellement

Les premiers réseaux de nivellement remontent au XIXe siècle. D'abord locaux et limités aux grandes villes, ils deviennent ensuite nationaux pour la réalisation de grands chantiers tels que les routes et canaux. C'est le début du *Nivellement général de la France* (NGF).

Plusieurs réseaux vont se succéder :

- le réseau *Bourdalouë* : créé par Paul Adrien Bourdalouë, le niveau zéro est placé en 1860 à Marseille et sert de point origine (c'est le point fondamental). Les observations auront lieu jusqu'en 1864. Aucune valeur de pesanteur n'est prise en compte dans ce réseau ;
- le réseau *Lallemand* : le service du NGF est créé en 1884 et dirigé par Charles Lallemand. Après une campagne marégraphique de 1885 à 1897, un nouveau point zéro « Lallemand » est créé et se trouve 71 mm en dessous du point zéro « Bourdalouë ». Les repères placés

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

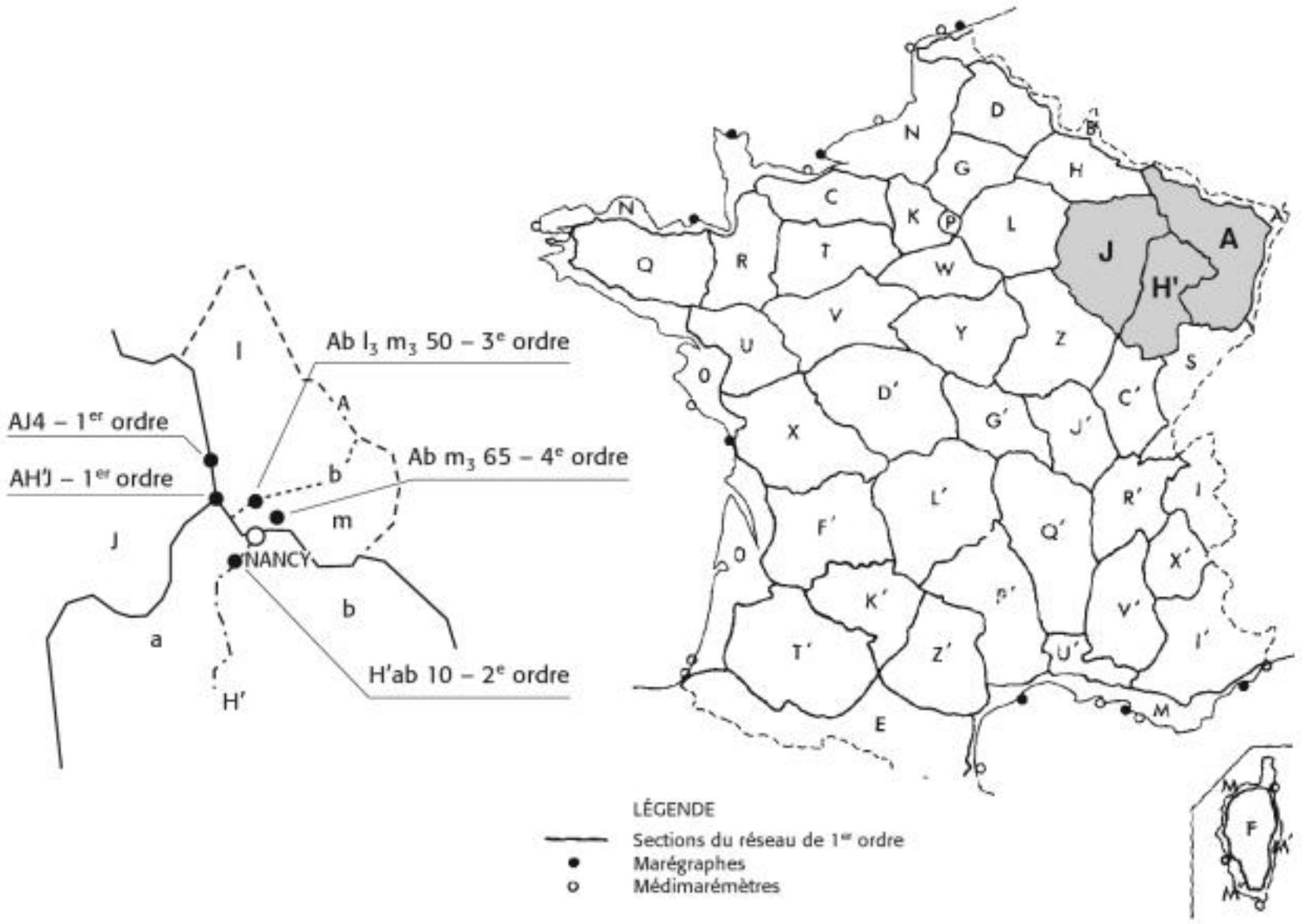


Figure 1.14. Mailles NGF.

Document IGN

Les informations concernant les repères de nivellement sont diffusées gratuitement par l'IGN dans les fiches signalétiques, disponibles sur geodesie.ign.fr ou sur le géoportail (www.geoportail.fr) (figure 1.15).

Le territoire compte un peu moins de 400 000 repères de nivellement, régulièrement entretenus, du premier au quatrième ordre, dont la précision est la suivante :

Ordre	Écart-type (entre 2 repères, au km)
1	2.0 mm
2	2.3 mm
3	3.0 mm
4	3.6 mm

Chaque fois que l'on effectue un nivellement, il est impératif de partir d'un repère donné pour se fermer sur un autre repère connu de manière :

- à vérifier que les repères IGN n'ont pas bougé à la suite de terrassements ou de travaux et que les altitudes sont bien les altitudes normales IGN69 ou IGN78 ;
- contrôler les observations et les calculs ;
- identifier le système d'altitude des nombreux repères posés par les collectivités et services techniques divers.

Nivellement Général de la France

Repère de nivellement

Matricule : **A.B.M3 - 73**

Système d'altitude : NGF-IGN 1969

202,907 m

Altitude NORMALE

Année de dernière détermination : 1973

Repère vu en place en 2001

Type : **M REPERE CYLINDRIQUE DU NIVELLEMENT GENERAL**

Complément :

Système : RGF93 - Ellipsoïde : IAG GRS 1980 - Méridien origine : GREENWICH

Longitude (dms) : **6° 12' 10'' E** *Latitude (dms) :* **48° 41' 57'' N**

Système : RGF93 - Projection : LAMBERT-93

E (km) : **935.65** *N (km) :* **6849.11**

Département : **MEURTHE-ET-MOSELLE** *Numéro INSEE :* **54395** *Commune :* **NANCY**

Voie suivie : **N.74**

de : **NANCY** *à :* **SEICHAMPS**

Coté : **Droit** *PK :* **-** *Distance :* **0,43** *km du repère* **A.B.M3 - 74**

Localisation :

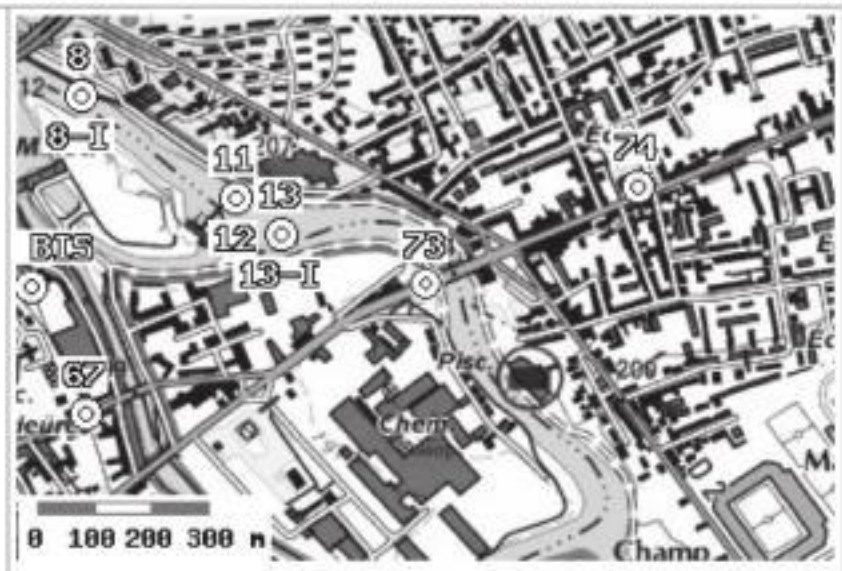
Support : **PONT SUR LA RIVIERE "LA MEURTHE"**

Partie support : **PARAPET EN RETRAIT SUR MUR EN RETOUR COTE "NANCY", FACE ROUTE**

Repèrements : **A 7.00 M DU BATIMENT ATTENANT VERS NANCY**
A 0.45 M AU-DESSOUS DE L'ARETE SUPERIEURE

Remarques : **Exploitable par GPS depuis une station excentrée**

Le repère est au centre de la photo



Carte : 3415 NANCY

Figure 1.15. Fiche signalétique d'un repère de nivellement.

Document IGN

1.4.4 Hauteur et altitude

Plusieurs composantes altimétriques sont donc disponibles pour un même point :

- la hauteur ellipsoïdale, h, distance entre le point et le pied de la normale à l'ellipsoïde AIG-GRS 80 (fig. 1.16) ;
- l'altitude normale IGN69 H, distance verticale entre le point et le quasi-géoïde.

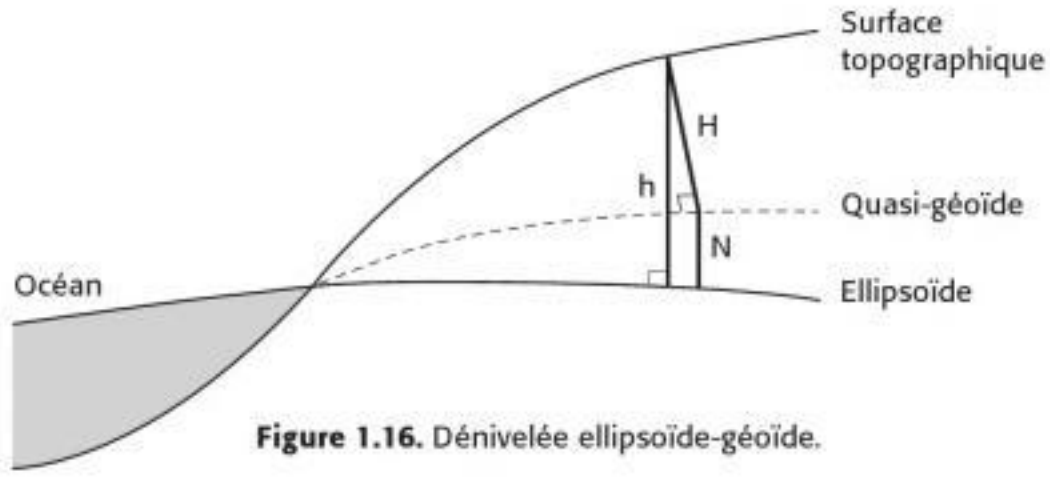


Figure 1.16. Dénivelée ellipsoïde-géoïde.

La hauteur séparant ellipsoïde et quasi-géoïde est appelée *ondulation*, notée N. On obtient donc la relation :

$$h \approx H + N$$

L'ondulation varie d'un endroit à un autre puisque le géoïde est irrégulier. Pour la déterminer, une surface de conversion calculée à partir du modèle de quasi-géoïde français QGF 98 et de points GPS nivelés est mise en place. La plus récente est la *RAF09, Référence des altitudes françaises 2009* (*RAC09* pour la Corse), remplaçant l'ancienne *RAF98* (figure 1.17). La précision de cette « grille », encore perfectible, est en moyenne de 2 à 3 cm.

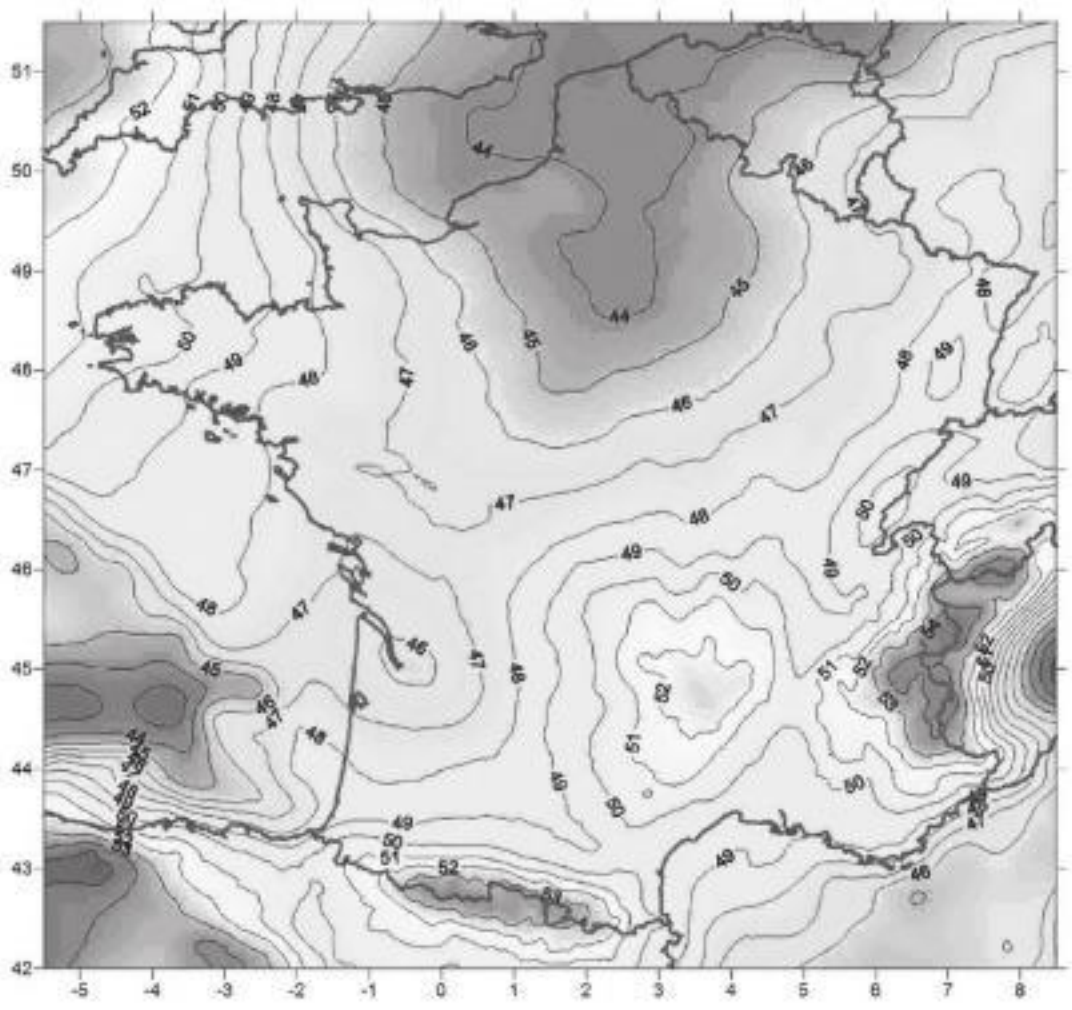


Figure 1.17. Grille RAF09.

Document IGN

1.5 Observations topographiques

En topographie, les observations s'appliquent à des longueurs généralement inférieures à quelques milliers de mètres et par conséquent contenues dans les polygones formés par les points des canevas géodésique et de nivellement. Dans ces limites, les images topographiques des points S, A, B du terrain (figure 1.18) sont les points s, a, b, projections orthogonales suivant des verticales rectilignes et parallèles sur le plan horizontal, ou plan topographique, d'altitude zéro ; un point du plan est donc l'image unique de tous les points situés sur sa verticale.

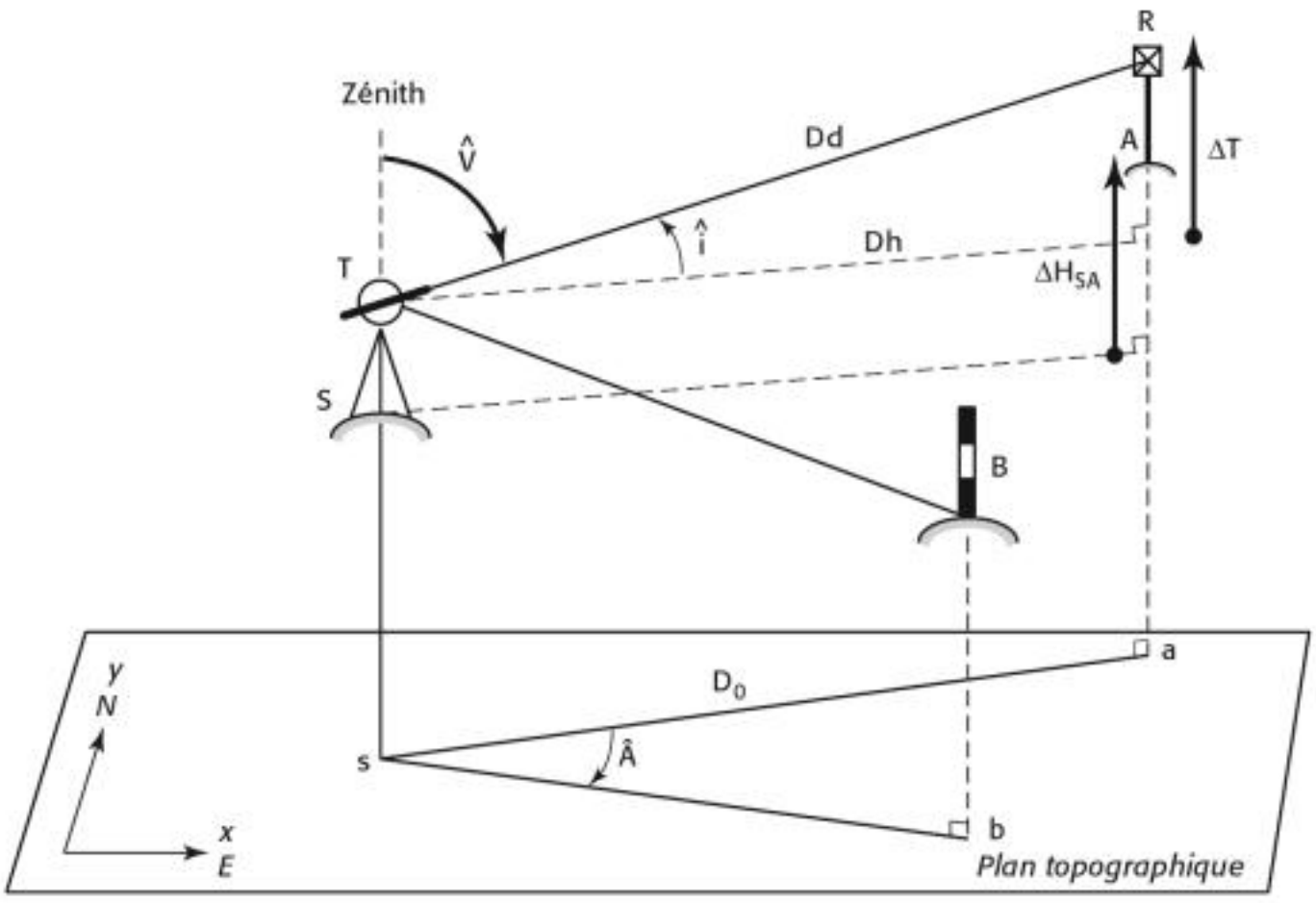


Figure 1.18. Observations topographiques.

Le positionnement des points s, a, b est assuré en planimétrie par leurs coordonnées rectangulaires E et N dans un système de projection et en altimétrie par leurs altitudes H dans les systèmes IGN69 ou IGN78. Pour un chantier isolé de faible étendue, le topographe peut aussi situer les points dans un repère orthonormé local xy sommairement orienté par rapport au nord et choisir un plan de référence horizontal d'altitude arbitraire.

Dans cet environnement simplifié, les observations topographiques sont classées en trois catégories.

1.5.1 Angles (§ 2)

Les angles sont mesurés à l'aide d'un *théodolite* T en station à la verticale de S, toutes les visées d'un même plan vertical ayant la même image topographique.

On distingue :

– l'*angle horizontal, ou azimutal,* Â *de deux visées* $\overrightarrow{TR}$ et $\overrightarrow{TB}$ qui est l'angle de leurs représentations topographiques sa et sb, autrement dit le rectiligne du dièdre des plans verticaux ; l'angle horizontal $\hat{A} = (\overrightarrow{sa}, \overrightarrow{sb})$ est mesuré sur le cercle horizontal du théodolite dans le sens des aiguilles d'une montre ;

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Elle est mesurée par *nivellement* direct ou indirect, à l'aide d'un niveau, d'un théodolite ou d'un *tachéomètre* lequel fournit, outre la distance et l'angle horizontal, la *dénivelée instrumentale* ΔT comptée depuis l'axe T de basculement de la lunette jusqu'au point visé, comme le réflecteur R par exemple ; le plus souvent elle est différente de la dénivelée ΔH des points de terrain S et A.

1.5.4 Positionnement satellitaire (§ 6)

L'actuel système américain opérationnel GPS de positionnement et de navigation par satellites est complété par le système russe GLONASS plus modeste, le chinois COMPASS et l'européen GALILEO à l'horizon 2015, avec lesquels il forme une synergie : le GNSS (*Global Navigation Satellite System*) qui permet de mesurer le système « Terre » dans son ensemble, de manière pérenne, continue, uniforme, globale et cohérente.

1.6 Précision des observations

1.6.1 Lexique

Grandeur, attribut d'un phénomène ou d'un corps qui est susceptible d'être distingué et déterminé quantitativement ; une grandeur s'exprime par le produit d'un nombre et d'une unité.

Valeur vraie d'une grandeur, valeur qui caractérise une grandeur parfaitement définie dans les conditions qui existent au moment où cette grandeur est examinée ; notion idéale, elle est en général inconnue et remplacée par une valeur approchée appelée *valeur conventionnellement vraie*.

Observation, action d'observer au moyen d'un instrument permettant des mesures ; par extension, mot utilisé en général au pluriel : résultats des mesures.

Mesurage, ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur.

Mesurage direct, méthode de mesurage par comparaison de la grandeur à mesurer avec une grandeur de même nature prise comme étalon ; mesurage d'une distance avec un ruban par exemple.

Mesurage indirect, méthode de mesurage d'une grandeur à partir des mesures d'autres grandeurs liées à celle-ci par une ou plusieurs relations connues.

Résultat d'un mesurage, valeur de la grandeur mesurée obtenue, souvent appelé « mesure ».

Le *résultat brut d'un mesurage* est le résultat avant corrections et avant la détermination de l'incertitude de mesurage.

La *correction* est la valeur qu'il faut ajouter algébriquement au résultat brut du mesurage pour obtenir le résultat corrigé : x cor = x brut + correction , soit $x = x_i + c_i \Rightarrow c_i = x - x_i$.

1.6.2 Erreurs parasites ou fautes

Incertitudes souvent grossières provenant de l'inattention ou d'un oubli de l'opérateur ; pour déceler les fautes, que l'on est toujours susceptible de commettre, on pratique des contrôles.

Le *contrôle* est l'opération comportant des appréciations, des observations et/ou des calculs destinés à déceler la présence de fautes.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Une *population* étant un ensemble de n *éléments*, une *série statistique à une variable* est la correspondance de chaque élément 1, 2, …, n, aux valeurs $x_1, x_2, \ldots, x_n$, du *caractère* x étudié. L'*effectif total* de la série est le nombre n d'éléments et son *étendue* l'écart entre la plus petite et la plus grande valeur du caractère.

Les *classes* sont des intervalles obtenus en divisant l'étendue de la série par un certain nombre ; les centres des classes correspondent à la moyenne des limites de chaque classe.

Le report sur l'axe des abscisses des limites des classes, puis le tracé des rectangles dont la base est l'intervalle d'une classe et les hauteurs $h_i = k \cdot n_i$ des longueurs proportionnelles aux effectifs des classes considérées, donne l'*histogramme* correspondant (figure 1.19).

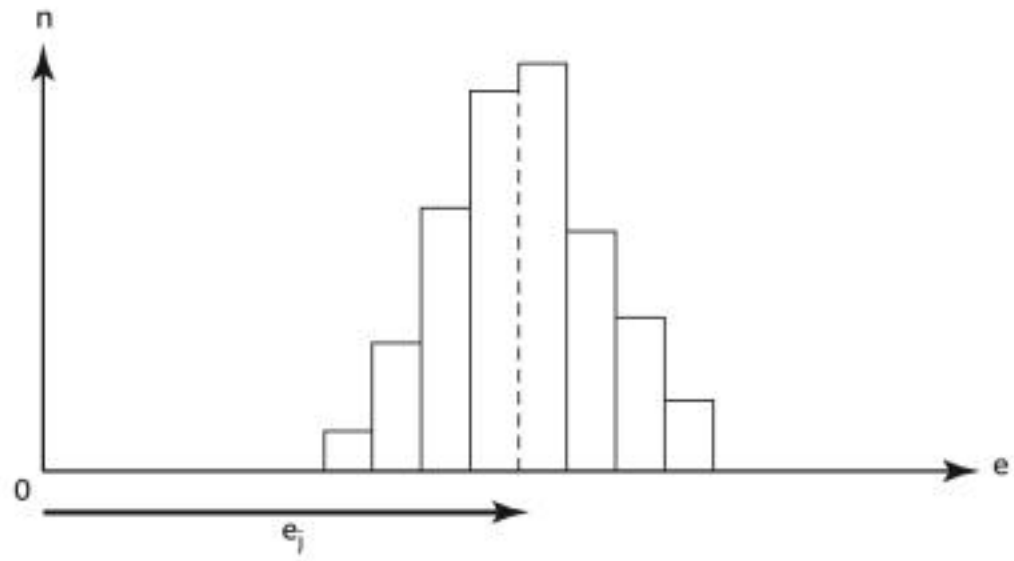


Figure 1.19. Histogramme.

Le tracé de l'histogramme des erreurs de n mesures entachées chacune d'une erreur de justesse e_i fournit – toutes choses égales – une dispersion qui correspond à la dispersion-type, mais centrée sur une valeur différente de zéro.

Le décalage de l'axe de symétrie de l'histogramme par rapport à l'origine des axes représente à peu près la valeur de l'erreur de justesse.

1.6.3.3 Droite moyenne

Soit $e_1 = x_1 - x$, $e_2 = x_2 - x$, …, $e_n = x_n - x$ les erreurs vraies des mesures de grandeurs de même espèce, dont on connaît les valeurs conventionnellement vraies par rapport à l'instrument ou la méthode utilisée, ces mesures ayant été faites dans les mêmes conditions.

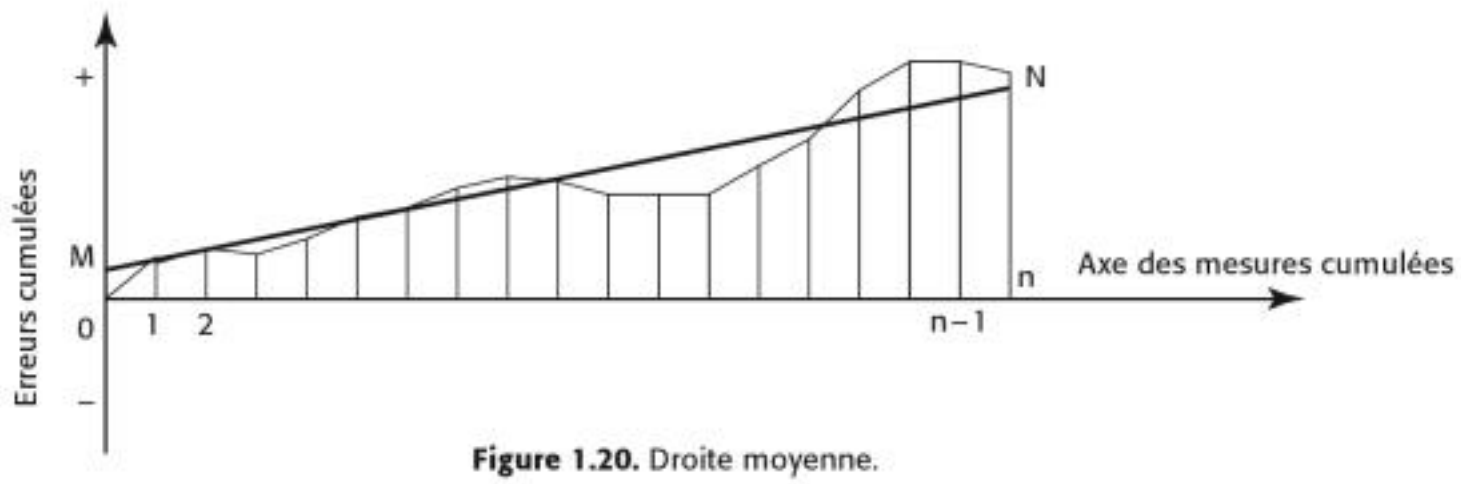


Figure 1.20. Droite moyenne.

Après avoir calculé les « erreurs cumulées » $e_1, e_1 + e_2, \ldots, e_1 + e_2 + \ldots + e_n$, qui sont des *caractères discrets* puisque discontinus, porter sur un axe à partir de l'origine 0 (figure 1.20) des longueurs 0 à 1, 1 à 2, …, n–1 à n, égales s'il s'agit de mesures d'angles, proportionnelles pour des mesures de distances ou des dénivelées ; les abscisses des points 1, 2, …, n représentent donc les mesures cumulées.

Au point 1 élever une ordonnée proportionnelle à e_1, au point 2 une ordonnée proportionnelle à $e_1 + e_2$, etc., au point n une ordonnée proportionnelle à $e_1 + e_2 + \ldots + e_n$, autrement dit élever en chaque point de l'axe portant les mesures cumulées une ordonnée représentant la somme des erreurs cumulées en ce point, réalisant ainsi un *diagramme en bâtons*.

La ligne brisée joignant les sommets des bâtons est le polygone des effectifs ou *polygone des erreurs cumulées* ; il chevauche une droite MN, appelée *droite moyenne*, pour laquelle les petits écarts positifs et négatifs du polygone à la droite sont dus aux erreurs accidentelles.

Lorsque les mesures sont exemptes d'erreurs systématiques, la droite moyenne est confondue avec l'axe des mesures cumulées ; en revanche, si les mesures sont entachées d'erreurs systématiques, du fait du cumul de celles-ci, la droite moyenne est inclinée par rapport à l'axe des mesures, la « pente » de cette inclinaison fournissant l'erreur de justesse en grandeur et en signe.

Pour que chaque point de la droite moyenne ne représente que les erreurs systématiques cumulées en ce point, elle doit remplir deux conditions :

- les aires situées entre la droite et le polygone doivent se répartir également au-dessus et en dessous de la droite ;
- parmi toutes les droites remplissant la première condition, la droite moyenne est celle qui détermine des sommes d'aires minima.

Tracer MN à l'estime en laissant de part et d'autre du polygone des aires aussi petites que possible qui s'annulent algébriquement.

Pour les mesures d'angles correspondant à des ordonnées équidistantes, l'erreur de justesse vaut :

$$e_j = \frac{nN - 0M}{n}.$$

Dans le cas de mesures de distances, ou de dénivelées, *l'erreur de justesse de l'unité de longueur* est égale à : $e_j = \dfrac{nN - 0M}{\sum_{i=1}^{n} D_i}$, expression dans laquelle $\sum_{i=1}^{n} D_i$ représente la somme des mesures, autrement dit la longueur 0n.

1.6.4 Erreurs accidentelles des mesures directes

1.6.4.1 Erreur absolue

L'*erreur accidentelle*, appellation habituelle en topographie de l'erreur aléatoire ou fortuite, est celle qui varie de façon imprévisible en valeur absolue et en signe lorsque l'on effectue un grand nombre de mesurages de la même valeur d'une grandeur, dans des conditions pratiquement identiques. On ne peut pas tenir compte de l'erreur accidentelle sous forme d'une correction apportée au résultat brut du mesurage ; on peut seulement, à la fin d'une série de mesurages exécutés dans des conditions pratiquement identiques (à l'aide du même instrument de mesurage, par le même observateur, dans les mêmes conditions d'ambiance, etc.), fixer les limites dans lesquelles se trouve, avec une probabilité donnée, cette erreur.

L'*erreur absolue* est la différence algébrique entre le résultat du mesurage et la valeur de comparaison : erreur absolue = résultat du mesurage - valeur de comparaison.

Dans tout ce qui suit, nous entendons par « résultat du mesurage » le résultat corrigé des erreurs systématiques.

Suivant la valeur de comparaison utilisée, on distingue :

1. L'*erreur absolue vraie* e, différence algébrique entre le résultat du mesurage et la valeur vraie ou conventionnellement vraie ; pour un nombre n de mesures de la même grandeur x, on a :

$$\begin{array}{c} e_1 = x_1 - x \\ e_2 = x_2 - x \\ \vdots \\ e_i = x_i - x \\ \vdots \\ e_n = x_n - x \\ \hline \sum_{i=1}^{n} e_i \approx 0 \end{array}$$

   Les erreurs vraies étant de signe aléatoire et du même ordre de grandeur ont une somme à peu près nulle.
   La correction valant $c_i = x - x_i \Rightarrow c_i = -e_i$, *la correction est l'opposée de l'erreur.*
   Pour un grand nombre de mesures d'une quantité connue, exemptes d'erreurs systématiques, les erreurs vraies obéissent à la loi normale.

2. L'*erreur absolue apparente* v, généralement appelée *écart* ou *écart à la moyenne*, est la différence algébrique entre le résultat du mesurage et la moyenne arithmétique des résultats d'une série de mesurages.
   La moyenne arithmétique d'une série (x_i , n_i) avec $1 \leq i \leq p$ est le nombre noté $\overline{x}$ tel que :

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{p} n_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^{p} n_i}, \quad n = \sum_{i=1}^{p} n_i \quad \text{étant l'effectif total.}$$

   L'*effectif* n_i de la valeur x_i du caractère est le nombre de fois où l'on rencontre cette valeur.
   La *fréquence* de x_i vaut $f_i = \frac{n_i}{n}$, elle est comprise entre 0 et 1 ; la somme des fréquences est évidemment égale à l'unité.

   Dès lors : $$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{p} n_i \cdot x_i}{n} = \sum_{i=1}^{p} \frac{n_i}{n} \cdot x_i = \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot x_i$$

   Les écarts à la moyenne :

$$\begin{array}{c} v_1 = x_1 - \overline{x} \\ v_2 = x_2 - \overline{x} \\ \vdots \\ v_i = x_i - \overline{x} \\ \vdots \\ v_n = x_n - \overline{x} \end{array}$$

   ont donc une somme nulle : $\sum_{i=1}^{n} v_i = 0$; de même, la moyenne des écarts est nulle : $\overline{v} = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i}{n} = 0$. En pratique, la notation e est souvent utilisée pour l'erreur apparente comme pour l'erreur vraie.

3. L'*erreur relative* est le quotient de l'erreur absolue par la valeur de comparaison utilisée pour le calcul de cette erreur absolue ; c'est une valeur algébrique souvent exprimée en « pour cent ».

1.6.4.2 Répartition expérimentale

Les erreurs de fermeture angulaire des 484 triangles de chaîne de l'ancienne triangulation de la France, placées dans des classes de 5 dmgon d'une série étendue de – 30 dmgon à + 30 dmgon, donnent :

dmgon	0	5	10	15	20	25	30	Total
+	105	84	40	9	3	2		243
–	103	86	34	13	3	2		241

Ce tableau fait apparaître trois propriétés :

- à tout écart positif correspond un écart négatif sensiblement égal ;
- les plus petits écarts, en valeur absolue, sont les plus nombreux ;
- les écarts restent inférieurs à un certain maximum ; on appelle *dispersion des écarts* l'étendue de la série statistique qui correspond aux valeurs extrêmes, soit ici 60 dmgon.

Le *polygone des effectifs* est la ligne brisée qui joint les milieux des bases supérieures des différents rectangles de l'histogramme (figure 1.21).

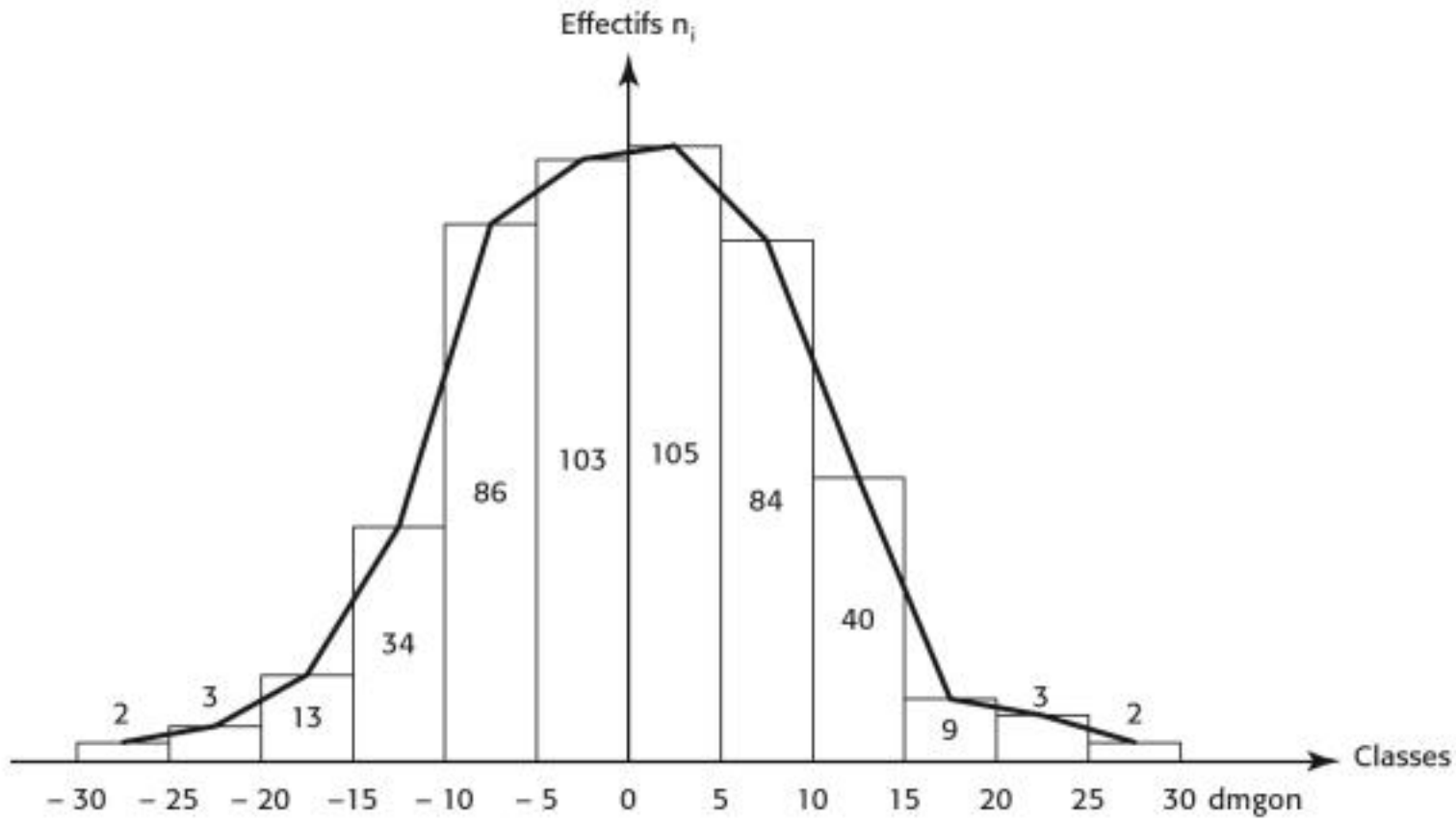


Figure 1.21. Polygone des effectifs.

La *médiane* est la valeur qui se situe au centre d'une série ordonnée par valeurs croissantes et partage donc cette série en deux groupes de même effectif ; ainsi, la médiane des erreurs précédentes est le plus petit écart positif, puisqu'il y a 241 écarts inférieurs et 242 supérieurs.

Les *quartiles* partagent une série en quatre groupes de même effectif. Dans l'exemple, le *quartile supérieur* correspond à un effectif de 484 : 4 = 121, donc à une valeur de l'écart comprise entre 5 dmgon et 10 dmgon du fait que 105 < 121 < (105 + 84) ; de même, le *quartile inférieur* est compris entre – 10 dmgon et – 5 dmgon.

L'*écart-type* σ de l'échantillon de n éléments, encore appelé *écart moyen quadratique*, est la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des écarts à la moyenne $\overline{x}$ des n éléments de l'échantillon ; par définition, c'est la racine carrée de la *variance*.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Exemple

Clocher d'Avrainville (figures 1.31 et 1.32) :

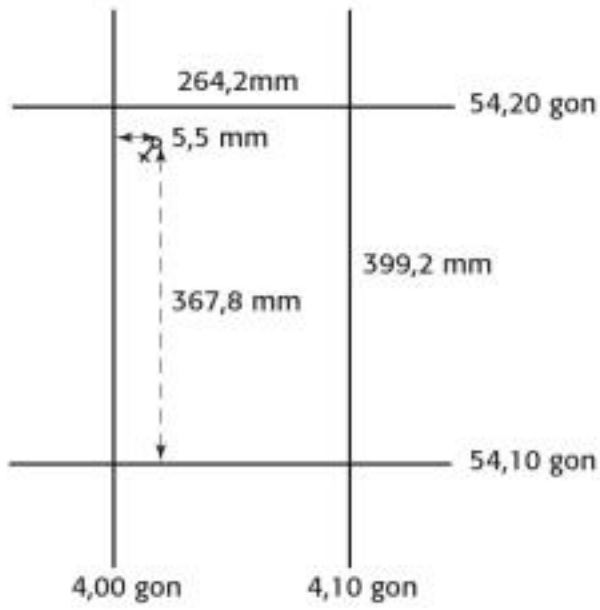


Figure 1.32. Coordonnées géographiques

$$\lambda = 4{,}00 \text{ gon} + \frac{0{,}10 \times 5{,}5}{264{,}2} = 4{,}0021 \text{ gon Est Paris}$$

$$\varphi = 54{,}10 \text{ gon} + \frac{0{,}10 \times 367{,}8}{399{,}2} = 54{,}1921 \text{ gon Nord}$$

Une différence de latitude de 1 dmgon correspond à une longueur sur le terrain égale à :

$$0{,}0001 \frac{\pi}{200} \; 6\,367\,000 \approx 10 \text{ m} ;$$

de même, le rayon d'un cercle parallèle de latitude φ valant : $R \cdot \cos\varphi$, une différence de longitude de 1 dmgon à Avrainville vaut : $10 \cdot \cos 54$ gon $\approx 6{,}6$ m. Les distances mesurées sur la carte ayant une précision pratique de l'ordre de 10 m, les coordonnées géographiques d'un point sont obtenues à quelques décimilligrades près.

1.7.3.2 Système géodésique mondial WGS84 ou RGF93

Les longitudes référées au méridien international et les latitudes sont obtenues de la même manière dans le système sexagésimal.

Exemple

Clocher d'Avrainville : λ = 5° 56' 19" Est Greenwich, φ = 48° 46' 22" Nord

Inversement, un point peut être placé sur une carte à l'aide de ses coordonnées géographiques WGS84, obtenues avec un GPS par exemple.

1.7.3.3 Coordonnées Lambert

Le quadrillage kilométrique de la zone Lambert concernée est matérialisé par des croisillons dans le corps de la carte et des amorces cotées en noir à l'intérieur du cadre.

Mesurer les appoints ΔE et ΔN entre le point et les axes qui le précèdent, en utilisant l'échelle graphique de la carte (figure 1.33) de manière à tenir compte du jeu du papier ; estime du décamètre.

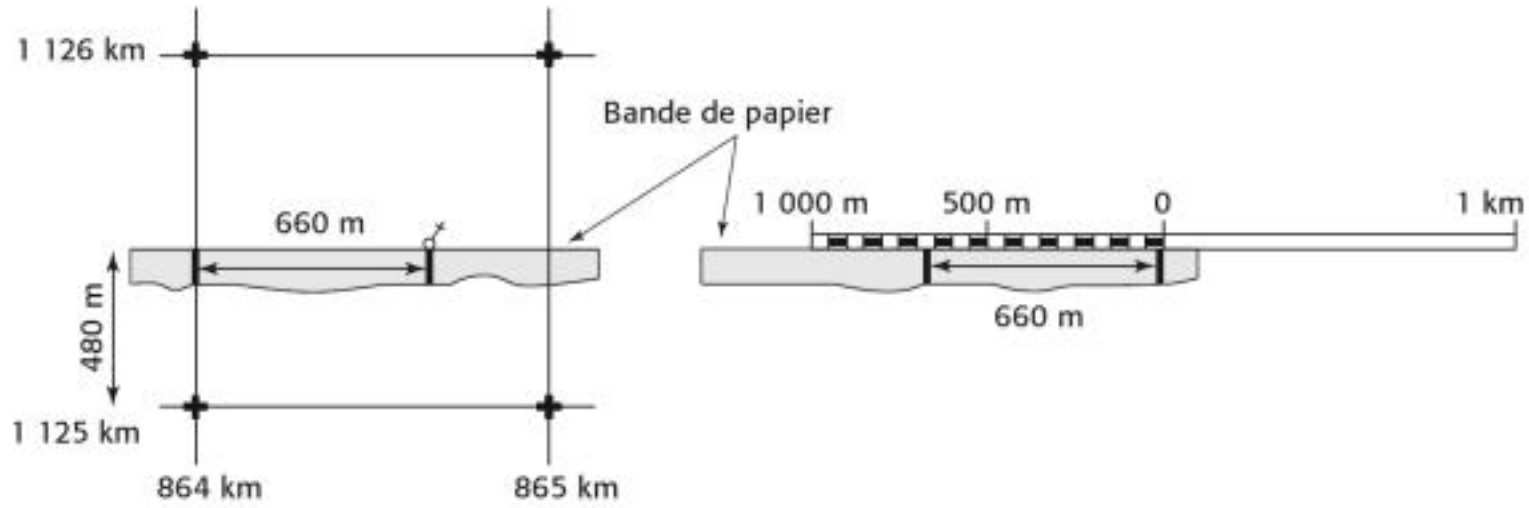


Figure 1.33. Appoints mesurés sur l'échelle graphique de la carte.

Clocher d'Avrainville : E = 864 km + 660 m = 864 660 m, N = 1 125 480 m
Le Lambert II étendu, chiffré en bleu, est exploité de la même manière ;
Clocher d'Avrainville : E = 864 790 m, N = 2 425 450 m.

1.7.3.4 Coordonnées UTM

Le quadrillage kilométrique UTM-WGS84 des TOP 25, imprimé en bleu, permet de se positionner sur la carte à partir des données d'un récepteur GPS.

Exemple

Clocher d'Avrainville : UTM31 GRS80 : E = 715 890 m, N = 5 406 380 m.

Les Séries bleues ont sur le cadre les amorces de l'UTM, noires pour le fuseau concerné, bleues pour l'éventuel recouvrement du fuseau adjacent.

1.7.3.5 Distances

Par nature, les distances mesurées sur une carte sont des distances horizontales.
L'utilisation de l'échelle à traits facilite le travail et permet de tenir compte du jeu du papier.
Si la mesure des distances rectilignes est immédiate, pour évaluer les distances curvilignes, enregistrer leur développement sur le bord d'une feuille de papier en l'assimilant à la ligne brisée : 0,1 + 1,2 + … + n – 1,n (figure 1.34).

Exemple

Distance du carrefour coté 223 sortie SE d'Avrainville à l'embranchement coté 245 au Nord, lieudit Les Michottes, en passant près de l'église : 970 m.

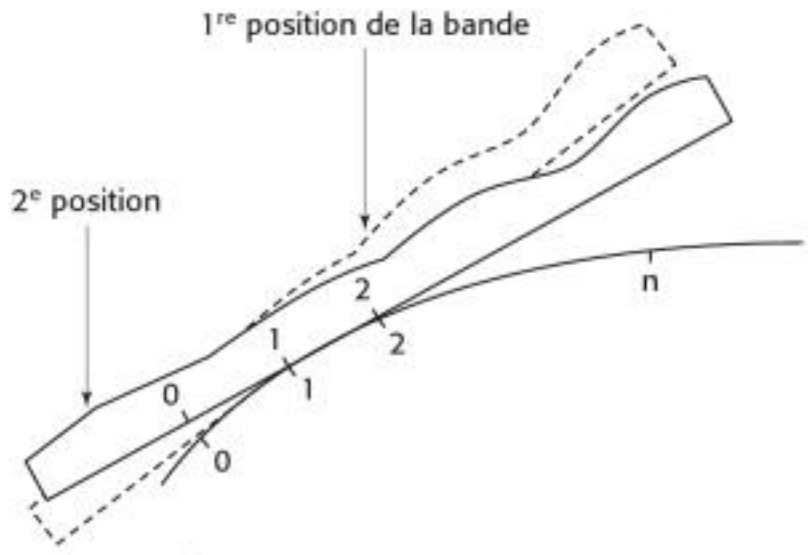


Figure 1.34. Distances curvilignes.

Si Dh est la distance horizontale mesurée, ΔH la dénivelée, la distance Dd suivant la pente considérée comme constante vaut : $Dd = \sqrt{D^2h + \Delta^2H}$.
Dans l'exemple ci-dessus, Dd = 970,2 m, soit un écart négligeable ; d'une manière générale d'ailleurs, il est illusoire de distinguer sur une carte distance horizontale et distance suivant la pente quand il s'agit d'un relief d'érosion.

1.7.3.6 Gisement

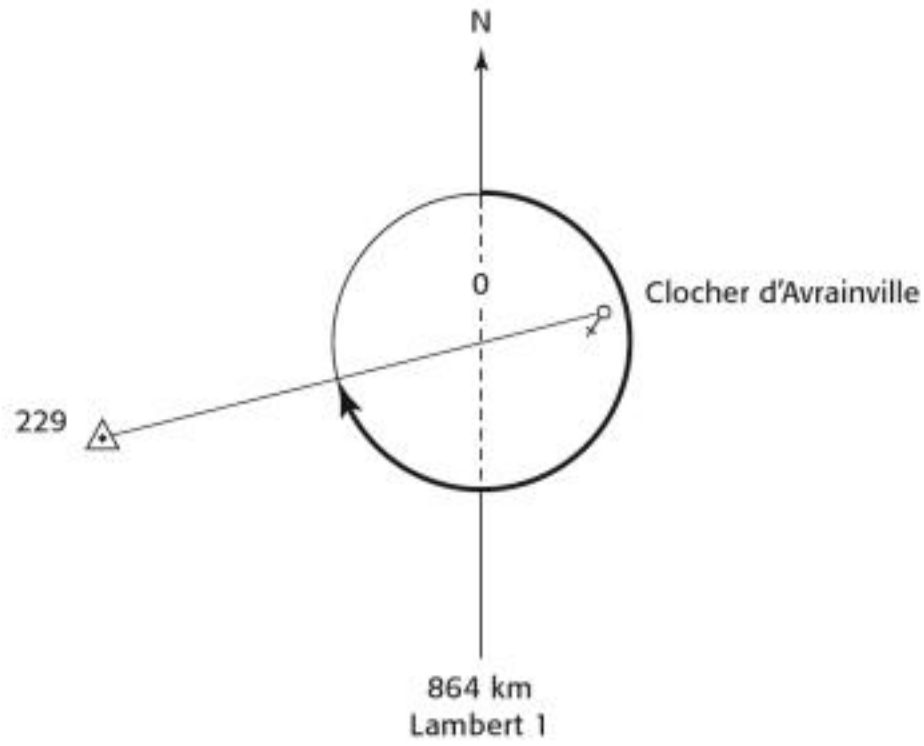


Figure 1.35. Mesure d'un gisement.

Le gisement d'une direction étant l'angle orienté compté depuis l'axe des N positifs du quadrillage, dans le sens des aiguilles d'une montre, borné à 0 gon et 400 gon, tracer un axe des ordonnées qui coupe la direction, centrer un rapporteur circulaire au point d'intersection le zéro origine dirigé vers les N positifs, lire le gisement au droit de la direction (figure 1.35).

Exemple

Gisement de la direction clocher d'Avrainville vers le point géodésique coté 229 : 285,8 gon.

1.7.3.7 Azimut géographique

Angle compté depuis la direction du nord géographique, il est mesuré comme un gisement en utilisant un méridien au lieu d'un axe des ordonnées.

Exemple

Azimut géographique de la direction précédente : 288,8 gon, soit une convergence des méridiens égale à :
$\gamma = 288{,}8 - 285{,}8 = 3{,}0$ gon.

1.7.3.8 Azimut magnétique

Compté depuis la direction du nord magnétique (§ 2.5.2), il est obtenu en ajoutant à l'azimut géographique la déclinaison magnétique calculée à partir des indications fournies par l'IGN ; en avril 2011 la déclinaison pour la feuille de Nancy valait : $0{,}15 \text{ gon} + \left(\frac{0{,}13 \times 64}{12}\right) \approx 0{,}84$ gon.
D'où l'azimut magnétique de la direction précédente : $288{,}8 + 0{,}84 \approx 289{,}64$ gon.

1.7.3.9 Orientation de la carte

Sur le terrain, la carte peut être orientée sommairement :

- au repère identifié, la droite de la carte qui joint le point où l'on se trouve au repère (clocher par exemple) étant confondue avec la ligne de visée ;
- à l'aide d'une boussole ou d'un déclinatoire (§ 2.5.2) qui donnent le nord magnétique du moment et du lieu ;
- avec une montre, retardée de 2 h l'été et 1 h l'hiver pour la mettre à l'heure solaire, en visant le soleil avec la bissectrice de l'angle formé par le 12 et la petite aiguille ; le nord est dans la direction du 6.

1.7.3.10 Angle horizontal de deux directions

Mesuré au rapporteur, il correspond à l'angle qui serait observé sur le terrain du fait que la projection est conforme.

Exemple

L'angle mesuré depuis le point géodésique coté 229, sur le château d'eau et le clocher d'Avrainville vaut 5,6 gon.

1.7.4 Orographie

L'expression cartographique du relief, ou orographie, est faite par l'intermédiaire de points cotés, courbes de niveau, signes conventionnels et estompage :

- *points cotés* : exactitude positionnelle, altitude arrondie au mètre.
- *courbes de niveau* : une courbe de niveau est une ligne qui relie les points consécutifs de même altitude du terrain ; elle est donc contenue toute entière dans un même plan horizontal et par conséquent projetée sans déformation sur le plan topographique (figure 1.36).

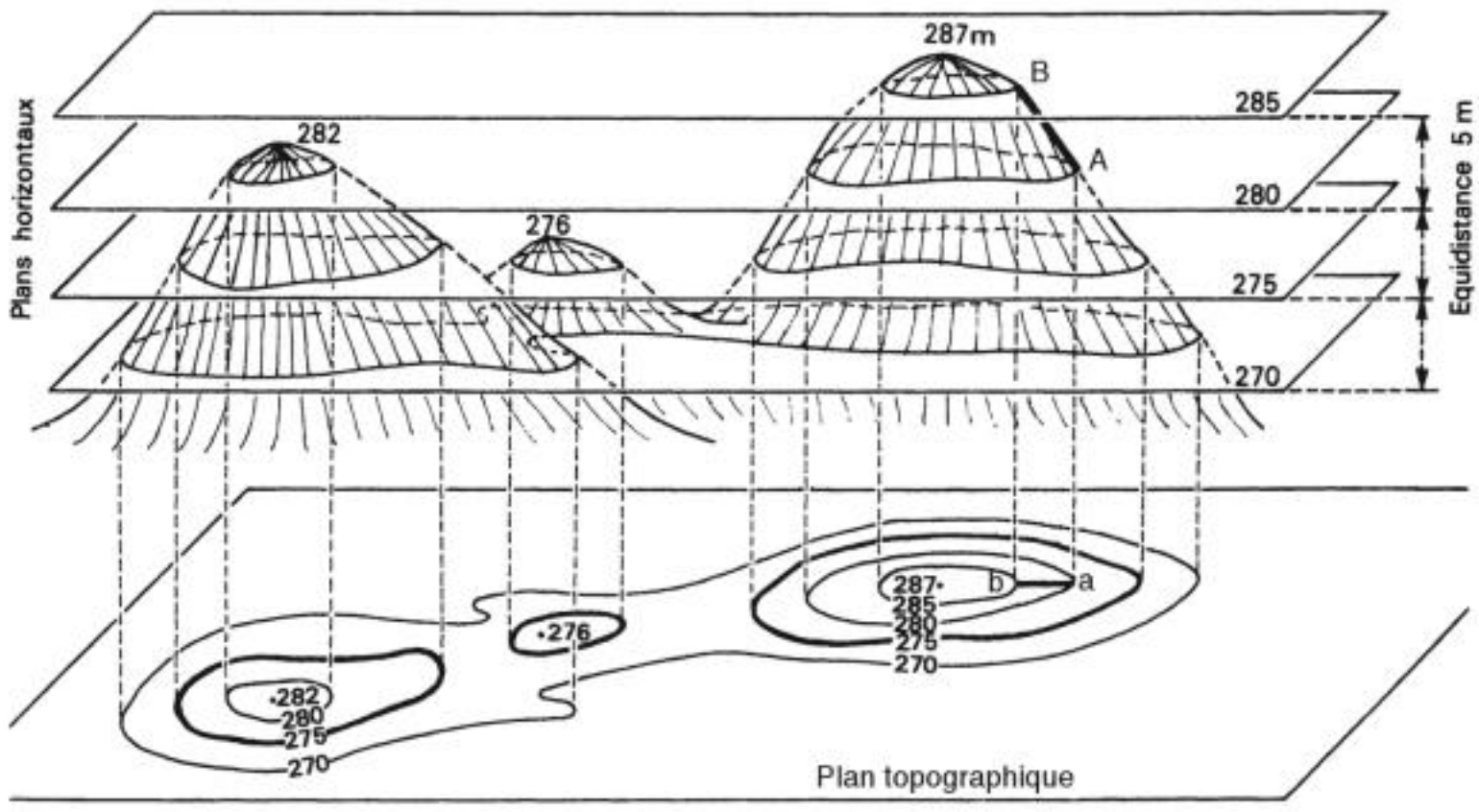


Figure 1.36. Courbes de niveau.

- l'*équidistance* est la différence d'altitude des plans horizontaux de deux courbes consécutives ; constante pour une feuille, elle est fonction de l'échelle et du relief, égale à 5 m le plus souvent pour la carte de base. L'équidistance est une dénivelée calculable, qui ne peut pas être mesurée sur la carte et qui n'a aucun rapport avec la distance horizontale ab projection de la distance AB du terrain entre deux courbes consécutives.

  Pour plus de clarté, les courbes sont dessinées en distinguant (figure 1.31) :
  - les courbes maîtresses, en trait continu épais, situées toutes les cinq courbes à partir de l'altitude zéro : ..., 250, 275, 300,... ; leurs altitudes sont généralement indiquées, les chiffres étant dirigés vers le haut du terrain ;
  - les courbes ordinaires, en trait continu moyen ;
  - les courbes intercalaires, en trait interrompu fin, qui ne sont en fait que des portions de courbes destinées à préciser un mouvement localisé de terrain que les courbes ordinaires ne font pas apparaître.
- *signes conventionnels de l'orographie* : si les courbes de niveau traduisent assez bien un relief d'érosion adouci, elles sont en revanche beaucoup plus difficiles à interpréter, quand elles peuvent être dessinées, dans les rochers, éboulis, falaises, etc. ; ces reliefs particuliers, souvent localisés, sont figurés par des signes conventionnels ne permettant guère la mesure.
- *estompage* : c'est un artifice qui procure une meilleure perception du relief en faisant ressortir les versants éclairés ou à l'ombre d'une lumière conventionnelle dirigée nord-ouest → sud-est et inclinée de 50 gon.

1.7.5 Exploitation de l'orographie

1.7.5.1 Pente en un point

La *ligne de plus grande pente* est la ligne d'écoulement des eaux ; au point m de la carte situé entre deux courbes de niveau (figure 1.37), c'est donc la plus courte distance limitée aux deux courbes et passant par le point. Elle est tracée sensiblement perpendiculaire aux courbes encadrantes.

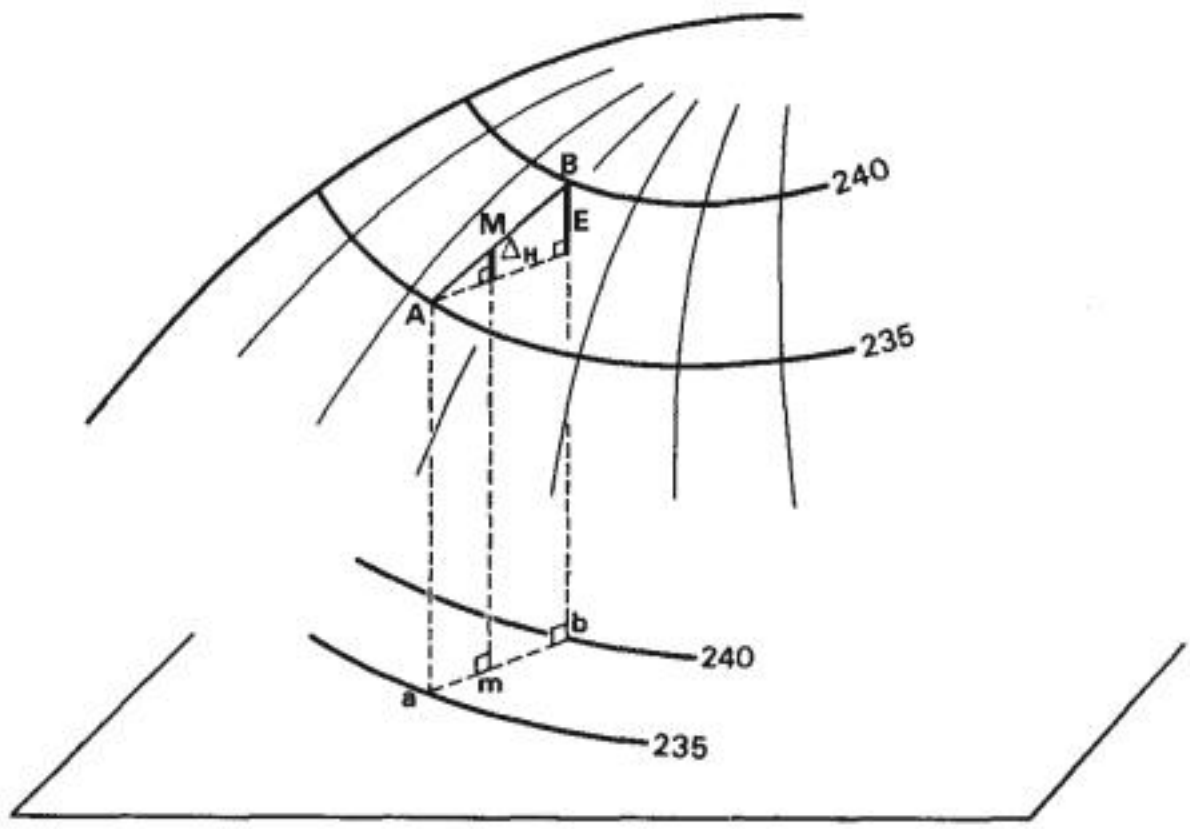


Figure 1.37. Pente et altitude graphiques.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

1.7.6 La cartographie numérique

1.7.6.1 Le Référentiel à grande échelle (RGE)

L'État a confié à l'IGN le développement du Référentiel à grande échelle (RGE) qui intègre des données issues de ses propres bases ou de celles d'autres producteurs. Le RGE est constitué de 4 composantes : BD Ortho, BD Topo, BD Parcellaire et BD Adresse.

1.7.6.2 La Banque de données topographiques (BD Topo)

Dès la fin des années 1970, l'IGN a entamé une réflexion sur la modernisation de ses outils de production par l'apport de l'informatique qui a conduit, entre autres, à l'avènement de la quatrième génération de la carte, sous forme de bases de données numériques : BD Alti, BD Géodésique, etc. et surtout BD Topo, dont la première feuille est sortie en 1991.

La BD Topo correspond globalement au contenu traditionnel de la 1/25 000 Série bleue, mais avec une précision métrique qui lui permet de servir de fond topographique à tout levé d'étude à partir du 1/5 000. Elle est disponible sur l'ensemble du territoire depuis 2007.

1.7.6.3 Le SCAN 25

C'est un ensemble de données issues de la carte Série bleue au 1/25 000 qui couvre l'ensemble du territoire national en dalles de 10 × 10 km. Il présente de nombreuses informations topographiques pour des usages à grandes et moyennes échelles. Il se décline en SCAN 25 touristique, SCAN 25 topographique, etc.

1.7.6.4 Le Géoportail

C'est un portail web public permettant l'accès à des services de recherche et de visualisation de données géographiques. Il a notamment pour but de publier les données géographiques de référence de l'ensemble du territoire français. Il est mis en œuvre par deux établissements publics, l'IGN *(Institut géographique national)* et le BRGM *(Bureau de recherches géologiques et minières)*.

Depuis son lancement en juin 2006, le Géoportail a progressivement été amélioré (meilleure résolution et fourniture de nouvelles informations comme les parcelles cadastrales et diverses données thématiques). Il permet de trouver et de visualiser de nombreuses données publiques locales concernant les infrastructures de transport, les plans locaux d'urbanisme, les cartes de prévention des risques, les parcellaires (figure 1.40), les réseaux hydrauliques, les photographies aériennes, les différents sites géodésiques (figure 1.41).

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Chapitre 2

Mesures des angles

2.1 Le théodolite

2.1.1 Conception

Le théodolite est un instrument de mesurage des angles, constitué essentiellement de trois axes concourants et de deux *goniomètres* appelés généralement *cercles* (figure 2.1).

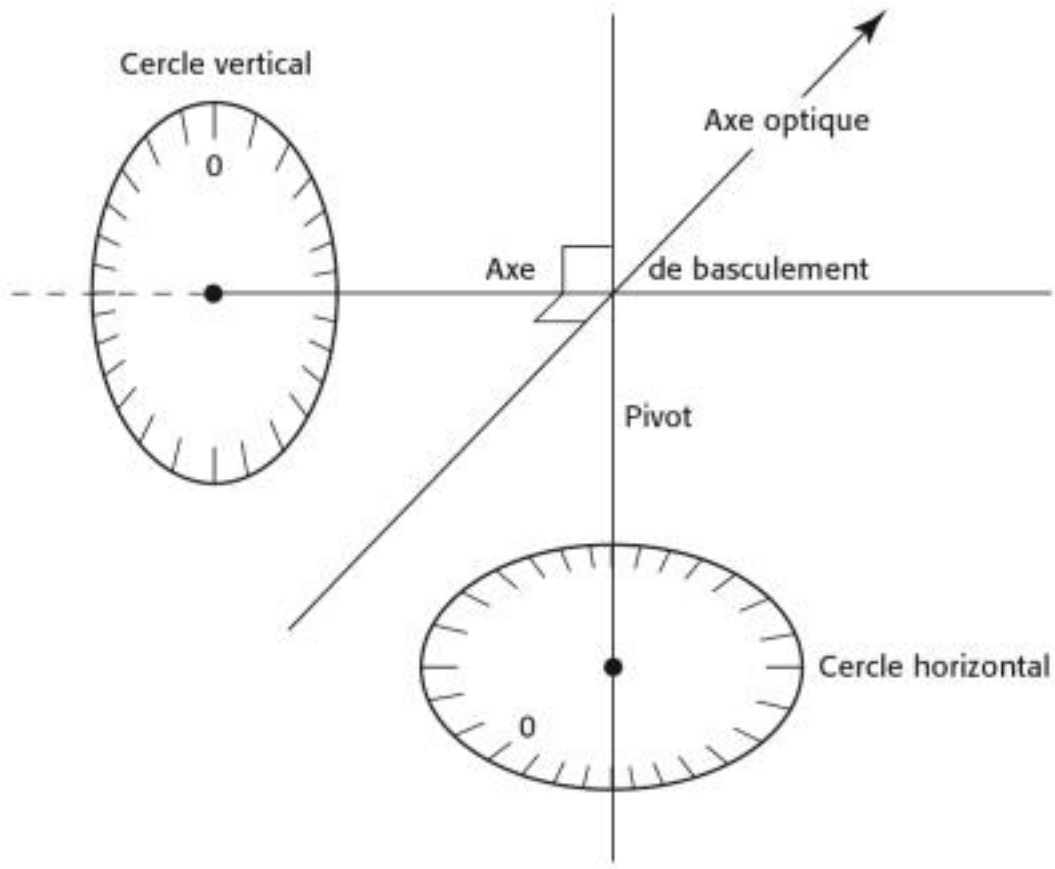


Figure 2.1. Schéma du théodolite.

On distingue :

- le *pivot*, ou axe principal, *calé verticalement* et *centré* c'est-à-dire confondu avec la verticale du point au sol ou au « toit » en travaux souterrains ; le théodolite est alors *en station* c'est-à-dire prêt pour le mesurage des angles horizontaux et verticaux ;
- l'*axe de basculement*, encore appelé axe secondaire ou axe des tourillons, perpendiculaire au précédent, donc horizontal au moment des observations ;
- l'*axe optique* de la lunette, perpendiculaire à l'axe de basculement, balaye un plan de visée vertical ;
- le *cercle horizontal*, centré sur le pivot, permet la mesure des angles horizontaux ;
- le *cercle vertical*, ou éclimètre, centré sur l'axe de basculement, autorise la mesure des angles verticaux.

À l'heure actuelle, deux catégories d'instruments sont utilisés :

Figure 2.2. Théodolite optique.

Figure 2.3. Théodolite électronique.

Document Leica

- *les théodolites optiques* (figure 2.2), instruments anciens, avec lesquels l'opérateur procède à une lecture optique en estimant généralement le milligrade pour les théodolites ordinaires, le décimilligrade pour les théodolites de précision ;
- *les théodolites électroniques* (figure 2.3), à lecture automatique, le microprocesseur intégré gérant le déroulement de la mesure et transmettant à l'affichage à cristaux liquides les lectures des cercles horizontal et vertical, avec une résolution pouvant atteindre 0,1 mgon.

Les sociétés européennes Leica et Trimble ont cessé la fabrication des théodolites optiques, désormais supplantés par les théodolites électroniques dans tous les ordres de précision.

2.1.2 Pivot

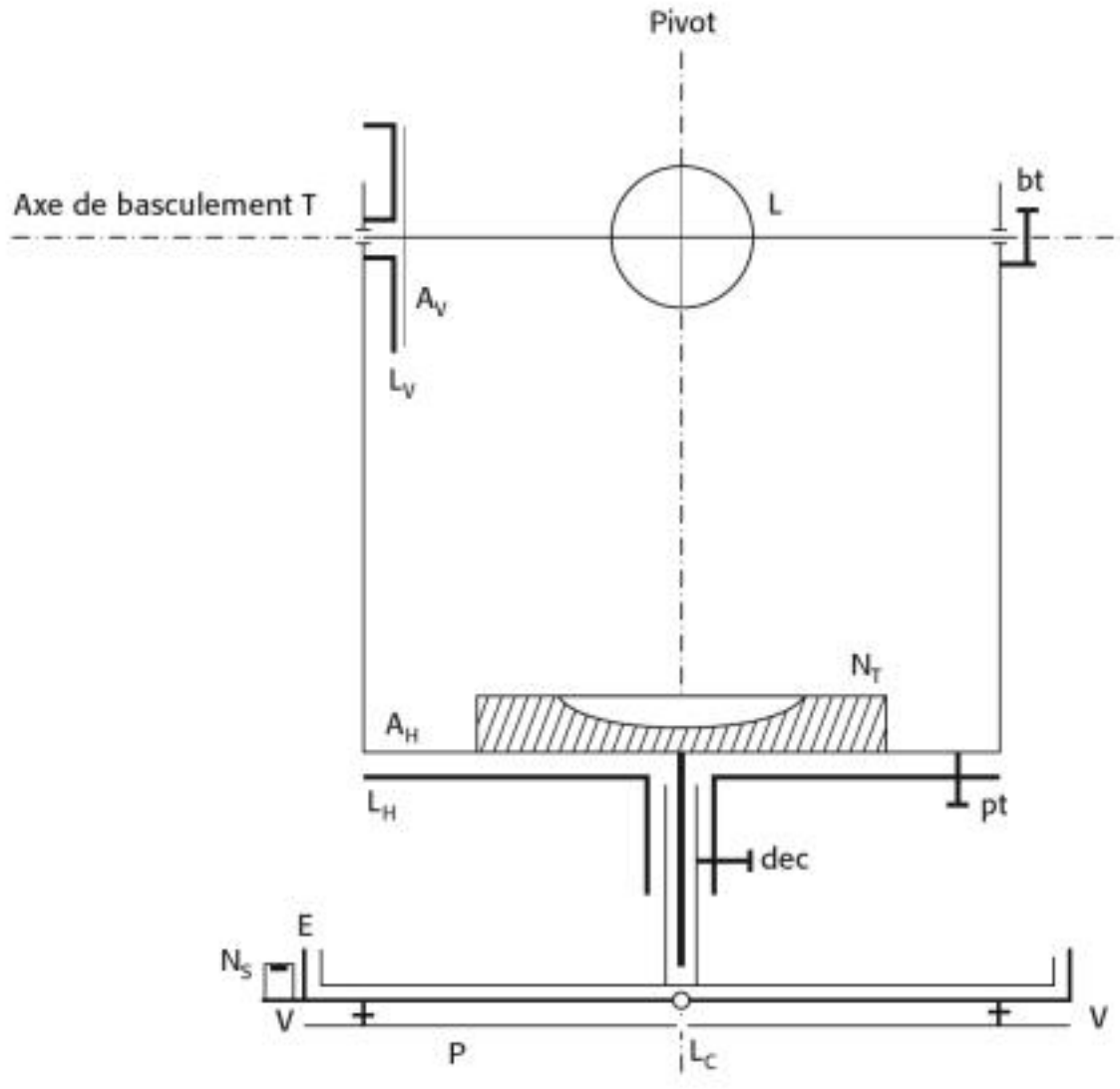


Figure 2.4. Coupe du théodolite.

2.1.2.1 Embase

La *plaque de base* P (figure 2.4), fixée sur la tête du trépied ou sur une console spéciale, porte *l'embase* E *à trois vis calantes* V formant un triangle équilatéral dont le pivot est le centre ; les vis calantes permettent le basculement de l'instrument, mouvement amorti par une plaque ressort.

Le calage sommaire de l'embase est réalisé avec la *nivelle sphérique* Ns, constituée d'une fiole en verre taillée intérieurement dans sa partie utile suivant une calotte sphérique, remplie incomplètement d'alcool ou d'éther très fluide, l'espace occupé par les gaz ayant la forme d'une *bulle circulaire*. *La nivelle est calée* lorsque la bulle est concentrique au cercle-repère gravé sur la fiole (figure 2.5) ; si tout était parfait, le pivot serait alors vertical.

Figure 2.5. Nivelle sphérique.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Pour une longueur *d'échelon*, autrement dit une longueur entre deux graduations, égale à 2 mm, la sensibilité des nivelles toriques d'alidade varie de 60" à 20"; la précision de calage est environ quatre fois meilleure.

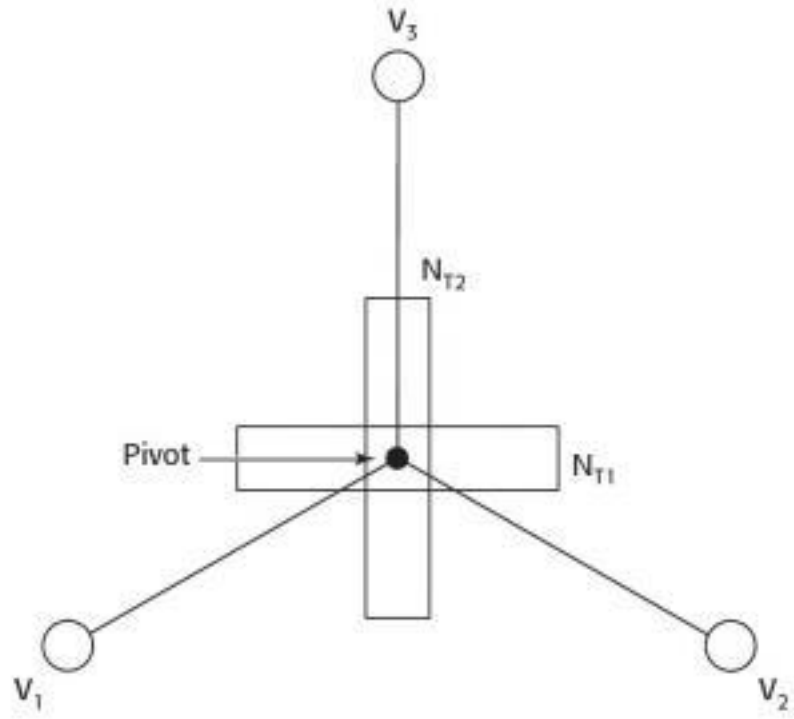


Figure 2.8. Calage du pivot.

Pour caler le pivot vertical (figure 2.8) :

- amener la nivelle à la position N_{T1} parallèle à la direction V_1-V_2 joignant deux vis calantes, puis caler la bulle en jouant simultanément et en sens contraires sur les vis V_1 et V_2 lesquelles basculent le pivot dans le plan vertical V_1-V_2 ;
- tourner l'alidade *d'un quart de tour* pour placer la nivelle dans la position N_{T2} perpendiculaire à la précédente, autrement dit parallèle à la direction Pivot-V_3, puis caler la nivelle en jouant uniquement sur la vis V_3 ; le pivot est alors à l'intersection des deux plans verticaux V_1-V_2 et Pivot-V_3, donc vertical ;
- recommencer une seconde fois la manipulation car la rotation de V_3 influe légèrement sur le calage antérieur de V_1-V_2.

Sur les théodolites électroniques récents, la nivelle torique est remplacée par une nivelle électronique à deux axes orthogonaux, calée à l'affichage (figure 2.9).

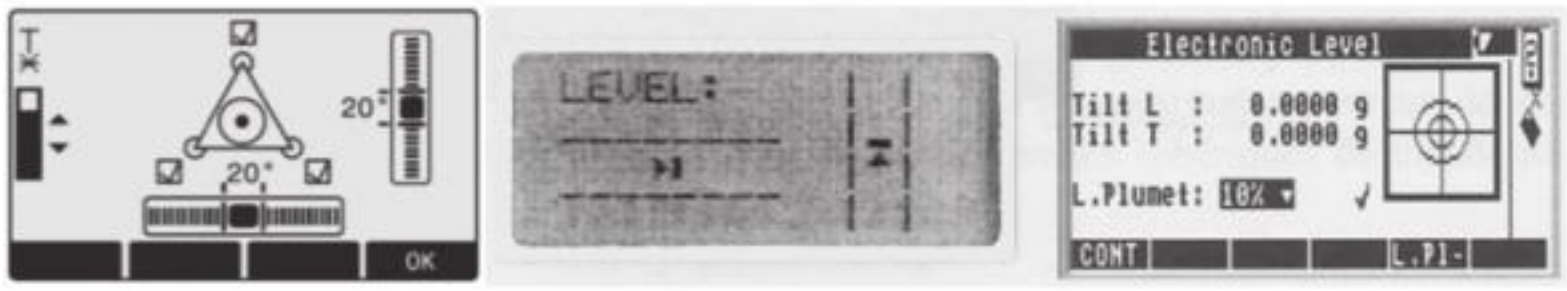


Figure 2.9. Nivelles électroniques.

Document Leica

Certains théodolites n'ont qu'une nivelle sphérique compte tenu :

- soit de la faible précision espérée,
- soit de la correction automatique de la lecture du cercle horizontal par un compensateur électronique bi-axes.

2.1.3 Cercle horizontal

2.1.3.1 Goniomètre

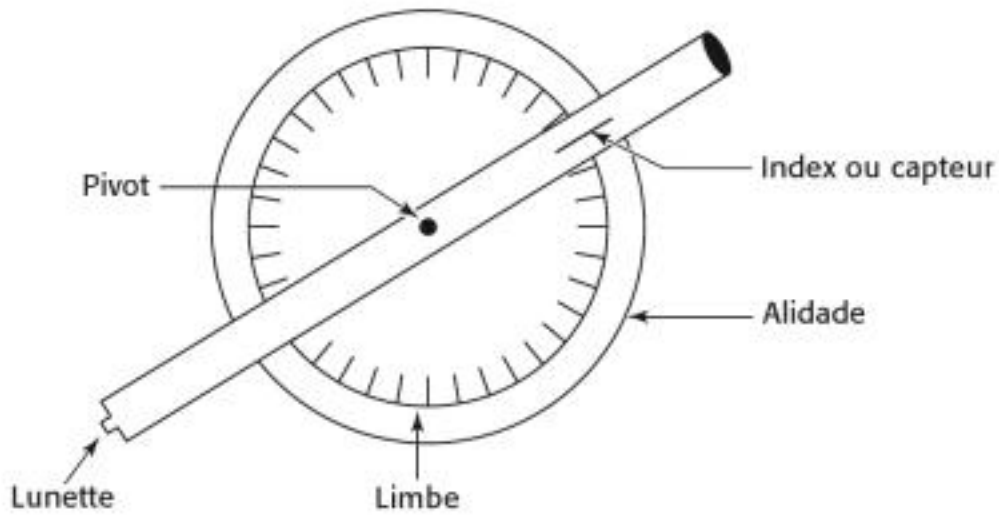


Figure 2.10. Goniomètre.

Un goniomètre est essentiellement constitué d'un *limbe* et d'une *alidade* (figures 2.4 et 2.10) :

- le limbe plan circulaire L_H (figure 2.4) porte l'échelle à traits chiffrée généralement en grades et croissant dans le sens des aiguilles d'une montre pour les théodolites optiques, incrémentée dans un sens ou dans l'autre, en grades ou en degrés, pour les théodolites électroniques ;
- l'alidade A_H est le cercle plan concentrique au limbe, mobile avec le pivot, qui porte la lunette et un index pour les théodolites optiques, un capteur pour les théodolites électroniques.

Sur certains théodolites, le plomb optique est monté sur l'alidade, notamment les instruments démunis de centrage forcé.

2.1.3.2 Lectures

La lecture optique mesure la valeur d'échelle du limbe depuis le zéro origine jusqu'à l'index de l'alidade ; le développement du limbe étant limité, la longueur d'échelon de l'échelle à traits photogravés sur verre l'est aussi et par conséquent, l'index se positionne généralement entre deux traits (figure 2.11).

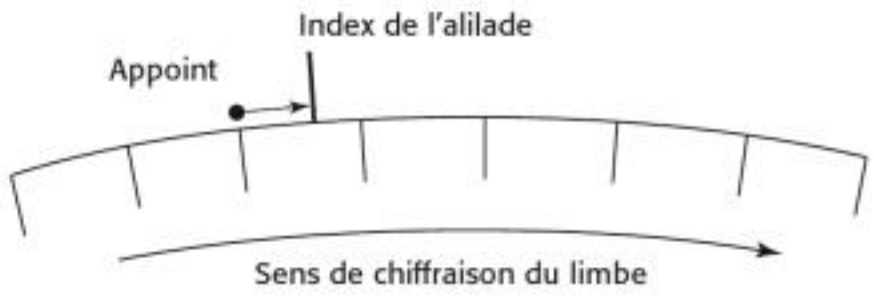


Figure 2.11. Lecture du cercle.

La valeur de la lecture optique est donc la somme de la valeur du trait qui précède l'index et de l'appoint, valeur de la partie d'échelon qui les sépare, obtenu à l'estime ou à l'aide d'un micromètre.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

2.2.2.5 Excentricité du viseur

Quand l'axe optique ne coupe pas le pivot ; négligeable en général, éliminée par le double-retournement.

2.2.2.6 Collimation horizontale

Si l'axe optique n'est pas perpendiculaire à l'axe de basculement, le défaut de perpendicularité $\hat{c}$, appelé collimation horizontale, fait décrire à l'axe optique un cône au lieu d'un plan vertical de visée et entraîne sur la lecture du cercle horizontal une erreur de la forme $e = \arcsin\left(\frac{\sin \hat{c}}{\sin \hat{V}}\right)$, éliminée par le double-retournement ou automatiquement sur certains théodolites électroniques.

2.2.2.7 Dérive

Déplacement lent et progressif du zéro de l'échelle ou plus généralement de l'indication au cours du temps. Elle provient souvent de la torsion du trépied, mouvement de vrille dû essentiellement aux variations de température ; pour réduire la dérive, travailler à l'ombre d'un parasol, éviter les longues stations, tourner l'alidade alternativement vers la droite et vers la gauche au cours des séquences successives.

2.2.2.8 Correction d'index ou collimation verticale

Elle est due au fait que le zéro origine du limbe vertical n'est pas exactement au zénith du centre ; éliminée par le double-retournement pour les instruments à index automatique ou nivelle de collimation ou encore automatiquement sur certains théodolites électroniques.

2.2.2.9 Erreur de réfraction

Sur une grande longueur, un rayon lumineux qui traverse des couches d'air d'indices de réfraction différents subit des déviations :

- la réfraction verticale, due au fait qu'en atmosphère calme la densité de l'air décroît avec l'altitude ce qui diminue l'indice de réfraction et par conséquent courbe le rayon vers le sol ;
- la réfraction latérale d'une visée proche d'une paroi rocheuse exposée au soleil par exemple est difficile, sinon impossible, à évaluer.

2.2.3 Erreurs accidentelles

2.2.3.1 Erreur de centrage

Le pivot vertical n'étant pas confondu avec la verticale physique du point de station au sol ou au toit ; elle varie de 0,5 mm environ à quelques millimètres selon le dispositif de centrage. L'erreur de centrage peut également affecter le signal, jalon planté « derrière » un piquet par exemple.

2.2.3.2 Erreur de pointé, l'axe optique ne coupant pas la verticale du signal

Le pointé est l'appréciation de l'écart existant le long d'une ligne : jalon, balise, mire, etc. ; le cerveau fait la moyenne des résultats obtenus par tous les cônes rétiniens situés le long de cette ligne, ce qui explique que le pointé ait une précision supérieure au pouvoir séparateur. Avec une lunette de grossissement × n on admet généralement les précisions suivantes : pointé

ordinaire $\frac{10}{\times n}$ mgon, encadrement $\frac{5}{\times n}$ mgon soit deux fois mieux, coïncidence c'est-à-dire prolongement de droites $\frac{2,5}{\times n}$ mgon soit quatre fois mieux que le pointé ordinaire.

L'erreur de pointé dépend également des dimensions, de la forme et de l'éclairage du signal ; pointer un jalon près du sol de manière à réduire l'influence de son défaut de verticalité (figure 2.16).

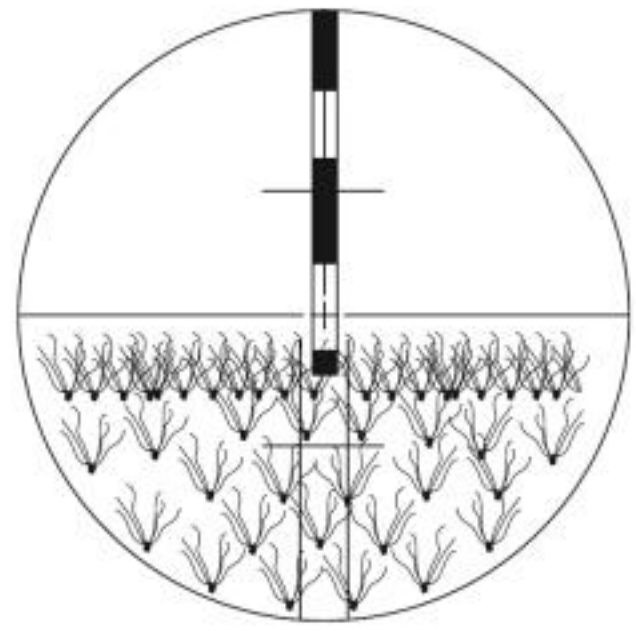


Figure 2.16. Pointé.

2.2.3.3 Erreur de lecture

Essentiellement fonction du dispositif de mesure de l'appoint pour une lecture optique.

2.2.3.4 Flamboiement de l'air

Le brassage des couches d'air de températures et de densités différentes se traduit dans la lunette par des images floues et mouvantes.

2.2.4 Écarts-types

Selon la norme DIN 18723, l'écart-type sur une direction mesurée dans les deux positions de la lunette varie de 2 à 3 mgon pour un théodolite ordinaire de résolution 1 mgon, de 0,2 à 1 mgon pour un théodolite de précision de résolution 1 dmgon, aussi bien pour le cercle horizontal que pour le cercle vertical.

2.3 Mesurage d'un angle horizontal

2.3.1 Mises en station

Mettre un théodolite en station consiste à réaliser simultanément le *calage* vertical du pivot et le *centrage* sur la verticale physique du point de station.

Le théodolite est fixé sur la tête d'un trépied à trois jambes coulissantes dont la tête évidée autorise une petite translation de l'appareil, la lunette étant à hauteur des yeux de l'opérateur debout. Ce dernier, après avoir placé l'instrument sensiblement au centre de la tête et réglé les vis calantes à mi-course, dispose l'ensemble trépied-théodolite au-dessus du point au sol en estimant au mieux l'horizontalité de la tête du trépied et le centrage du point, tout en enfonçant les jambes à refus si le sol est meuble ; il peut aussi mettre seulement le trépied en station à l'estime et y fixer le théodolite après coup. Dans une forte pente, placer deux jambes du trépied sur une même courbe de niveau en aval du point, la troisième en amont. La qualité de cette *mise en station à l'estime* conditionne la réussite des manipulations suivantes réalisées dans l'ordre chronologique :

1. Pointer le plomb optique ou plomb laser sur le point au sol avec les vis calantes.
2. Caler la nivelle sphérique de l'embase en jouant sur les longueurs des jambes du trépied.
3. Caler le pivot vertical à l'aide des vis calantes et de la nivelle torique ou électronique.
4. Centrer le plomb optique ou plomb laser sur le point de station en translatant l'instrument sur la tête du trépied.
5. Terminer par un calage soigné du pivot.
6. Éventuellement, affiner une seconde fois le centrage puis le calage.

En dessous d'un point au « toit » ou au « plafond », après avoir mis le théodolite en station à l'estime :

1. Caler le pivot puis basculer la lunette à l'horizontale pour lire l'angle zénithal : V = 100 gon.
2. Centrer le repère de centrage de la lunette sous la pointe d'un fil à plomb en translatant l'appareil sur la tête du trépied.
3. Terminer par un calage soigné.
4. Éventuellement, affiner une seconde fois le centrage puis le calage.

Un viseur zénithal fixé sur la lunette permet la mise en station sous un point au toit avec une précision de 1 à 2 mm pour une hauteur de 10 m.

Selon les travaux à réaliser, d'autres dispositifs peuvent être mis en œuvre :

- centrage à l'aide d'un fil à plomb suspendu en dessous de la tête du trépied ;
- canne télescopique à nivelle sphérique donnant la hauteur de l'instrument au-dessus du point ;
- trépieds centrants avec ou sans canne ;
- consoles spéciales ;
- plaque de centrage sur pilier ;
- douille et boule de centrage forcé ;
- oculaires coudés à angle droit, plomb optique zénithal de précision, etc.

2.3.2 Séquence

La *séquence* est un ensemble de n + 1 lectures effectuées au théodolite, en une même station, sur n directions différentes, avec une même origine du limbe, une même position du cercle vertical par rapport à la lunette, contrôle de fermeture sur la référence et répartition de l'écart de fermeture sur les diverses composantes de la séquence.

Le résultat est *l'angle compté depuis la référence dans le sens de chiffraison du limbe*, généralement le sens des aiguilles d'une montre.

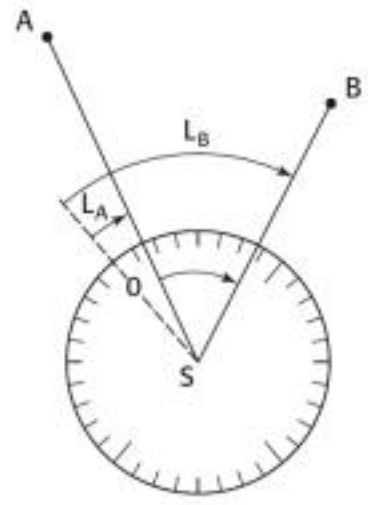


Figure 2.17. Séquence.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Chapitre 3

Mesures des distances

3.1 Mesurage au ruban

La distance est mesurée en reportant l'étalon bout à bout un certain nombre de fois ; le mesurage au ruban est donc une *mesure directe*.

3.1.1 Jalonnement

Un *jalon* est un tube métallique de 200 × 3 cm environ, constitué de un ou plusieurs éléments, peint en rouge et blanc, enfoncé par percussions successives dans un sol meuble, maintenu par un trépied léger sur une surface dure, comme un trottoir asphalté par exemple (figure 3.1).

Tous les points d'une verticale ayant la même image topographique, la verticalité du jalon est réalisée à l'estime ou en le plaçant à l'intersection de deux plans verticaux perpendiculaires définis par l'œil de l'opérateur et par un fil à plomb tenu à bout de bras.

Le *jalonnement* consiste à aligner plusieurs jalons entre deux autres, afin de disposer de repères intermédiaires au cours du mesurage.

Figure 3.1. Jalon et porte-jalon.

Document Leica

3.1.1.1 Jalonnement sans obstacle

À vue

Figure 3.2. Alignement à vue.

L'opérateur se place quelques mètres derrière le jalon A (figure 3.2), vise le bord du jalon en direction de B et fait placer par un aide les jalons intermédiaires 1, 2, 3 en commençant de préférence par le plus éloigné.

Avec un théodolite

Figure 3.3. Alignement au théodolite.

Après avoir mis le théodolite en station au point A (figure 3.3), viser le jalon B à son axe et le plus près possible du sol de façon à réduire l'influence du défaut de verticalité, puis faire placer par un aide les jalons intermédiaires en commençant par le plus éloigné.

Oculaire laser

Un laser (*Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation*), est un appareil qui fournit un faisceau lumineux monochromatique de très faible divergence : le milliradian. Un oculaire laser verrouillé sur un théodolite (figure 3.4) donne un faisceau lumineux rouge de forte brillance, permanent, qui permet la visualisation sur cible de tout point entre A et B.

Diamètre du point lumineux 4 mm/100 m et 6,5 mm/200 m.

Portées : environ 150 m de jour et 400 m la nuit.

Figure 3.4. Oculaire laser.

Document Leica

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

3.1.2 Méthodes de mesurage

3.1.2.1 À plat

Le mesurage est effectué avec un décamètre ou un double décamètre, ruban d'acier émaillé ou enrobé de nylon polyamide teinté, gradué tous les centimètres, monté dans un boîtier muni d'une manivelle d'enroulement et souvent d'une poignée (figure 3.9) ; les rubans de 30 m et 50 m sont plus fragiles et ne sont pas faciles à manipuler.

Figure 3.9. Ruban et fiches.

Documents Leica

Le ruban reposant entièrement sur le sol, les portées, autrement dit les longueurs entières de ruban, sont matérialisées par des fiches (figure 3.9), tiges de gros fil de fer de 20 cm environ, épointées à une extrémité, cintrées en forme d'anneau à l'autre.

Avec un ruban de 10 m, utiliser un jeu de 11 fiches de manière que l'échange de fiches s'effectue à 100 m = 10 × 10 m, soit 10 fiches ramassées au fur et à mesure par l'opérateur arrière, la onzième restant bien entendu plantée (figure 3.10).

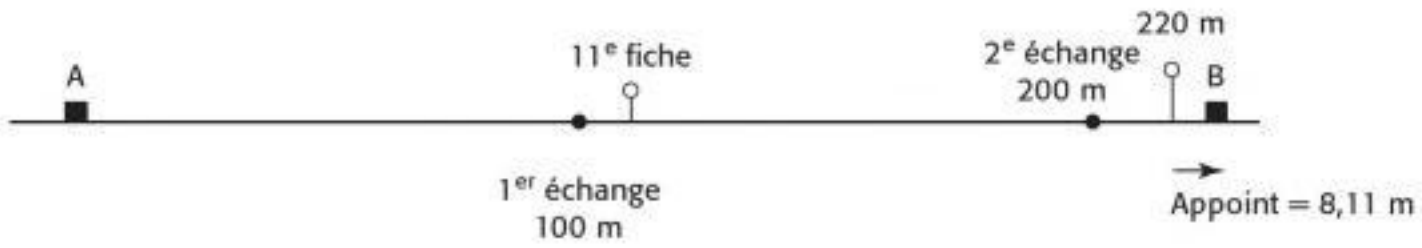


Figure 3.10. Échanges de fiches.

Lorsque les deux opérateurs sont arrivés à l'extrémité B, le décompte de la longueur totale mesurée est très simple :

$$AB = 2 \text{ échanges} + 2 \text{ fiches} + \text{appoint} = (2 \times 100) + (2 \times 10) + 8{,}11 = 228{,}11 \text{ m}.$$

Avec un ruban de 20 m, utiliser un jeu de six fiches, la sixième permettant le relais des 5 × 20 m.

3.1.2.2 Étalonnage et dilatation

L'étalonnage est l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer les valeurs des erreurs d'un instrument de mesurage.

Pour un ruban, l'étalonnage débouche sur une *correction d'étalonnage à une température de référence*, le plus souvent 0 °C, du fait que la longueur du ruban varie avec celle-ci ; comme

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

faisceau conique ; la « tache lumineuse », visible ou non, engendrée par ce dernier augmente donc de diamètre au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'instrument. Afin de renvoyer une énergie suffisante pour la mesure, il est nécessaire d'augmenter la surface réfléchissante dès que l'on atteint une certaine longueur ; *les portées sont donc fonction du nombre de réflecteurs élémentaires accolés.*

3.2.3.2 Réflecteur

C'est un dispositif inerte dont la nature dépend de la puissance énergétique à renvoyer. Si celle-ci est suffisante, une surface lisse telle une paroi bétonnée, un papier adhésif réfléchissant ou un réflecteur plastique élémentaire peuvent convenir, ce qui facilite les mesures dans certains cas : parois rocheuses et coins de murs par exemple. Toutefois, dès que l'énergie réfléchie est insuffisante, du fait de la distance notamment, le réflecteur est un prisme rhomboédrique, ou *coin de cube*, tronqué pour réduire sa fragilité (figure 3.19).

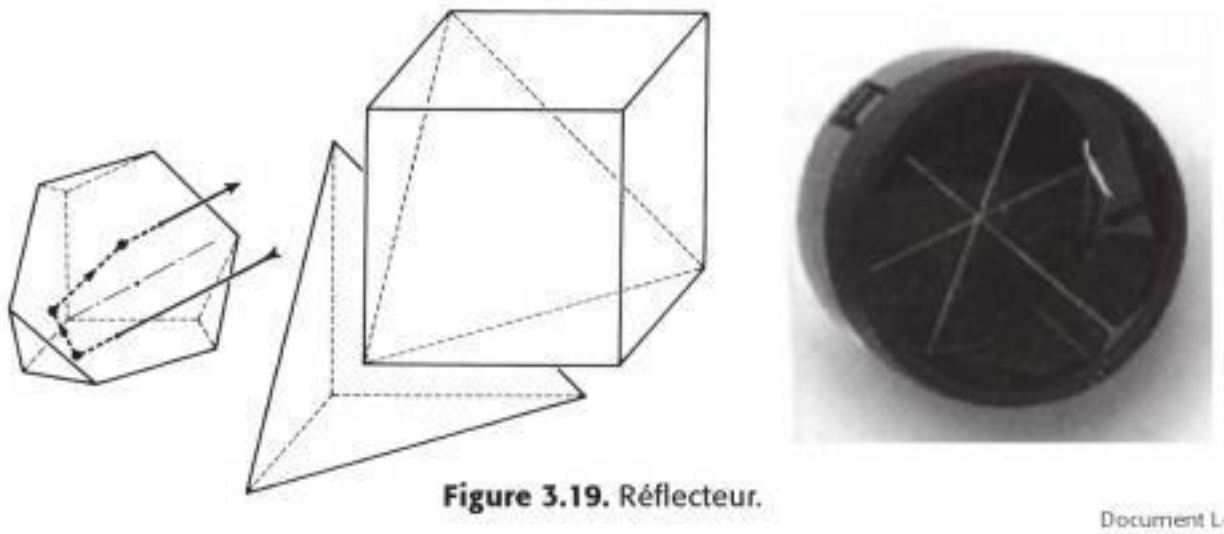


Figure 3.19. Réflecteur.

Document Leica

Un rayon lumineux subit trois réflexions successives sur les trois faces réfléchissantes formant un trièdre trirectangle, avant d'émerger parallèle à lui-même dans la position symétrique par rapport à la droite passant au sommet du trièdre ; cette droite est l'axe de visée lorsque l'axe optique de la lunette et celui du distancemètre sont coaxiaux (figure 3.20).

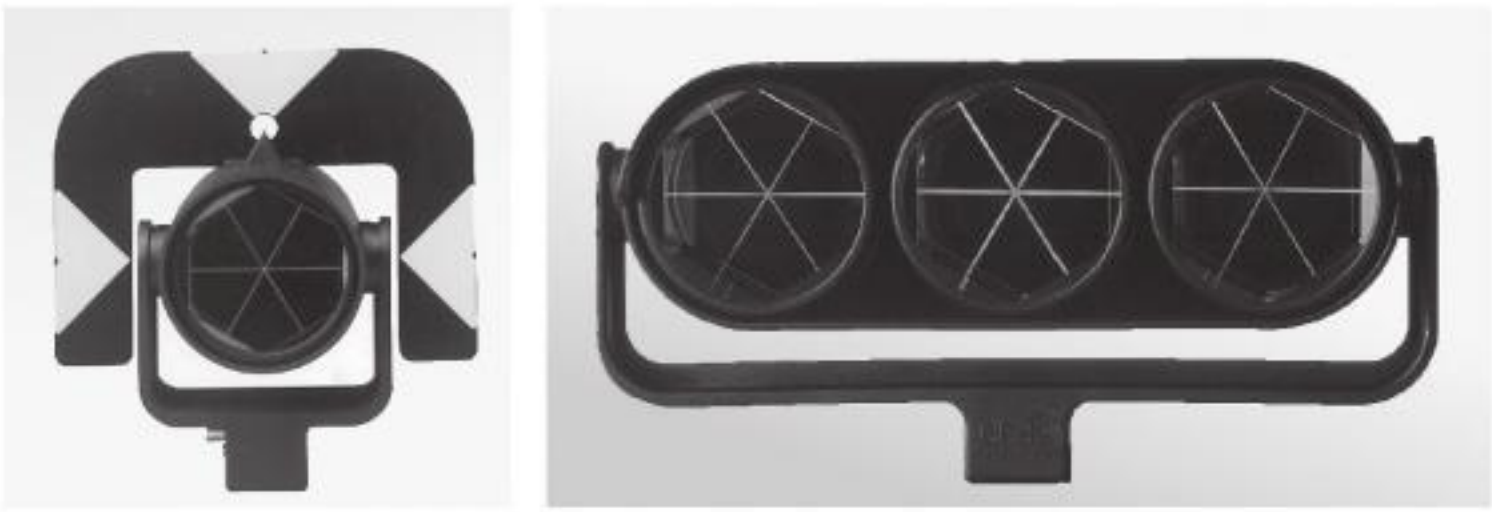


Figure 3.20. Lunette et distancemètre coaxiaux.

Documents Leica

Le réflecteur est un dispositif inerte, maintenu manuellement à la verticale du point à l'aide d'une canne télescopique munie d'une nivelle sphérique, ou stabilisé avec un trépied léger ; pour les mesures précises, ou les montures lourdes multiprismes, le réflecteur est verrouillé dans une embase à centrage forcé placée sur un trépied.

Une réflexion parasite, grillage à mailles serrées ou pare-brise par exemple, peut fausser le résultat.

La recherche du réflecteur peut être facilitée par un détecteur sonore ou lumineux.

L'optique de réception similaire à celle de l'émission ; les deux optiques sont juxtaposées de la manière la plus compacte possible pour que les champs d'émission et de réception soient proches.

La mesure électronique, qui porte sur une grandeur physique variant de façon continue, est une *mesure analogique* ; le convertisseur analogique-numérique affiche la distance directe en ligne droite entre le distancemètre et le réflecteur, à la température et à la pression atmosphérique ambiantes ; le nombre affiché par cristaux liquides (LCD) sept segments et point décimal, comporte le plus souvent 7 chiffres significatifs, celui des millimètres occupant le rang décimal inférieur et représentant le *seuil de mobilité* ou *résolution* de l'instrument.

3.2.4 Distancemètres de topographie

Ils sont modulaires ou intégrés.

3.2.4.1 Modulaires

Fixés sur la lunette d'un théodolite, ils basculent avec celle-ci (figure 3.21)

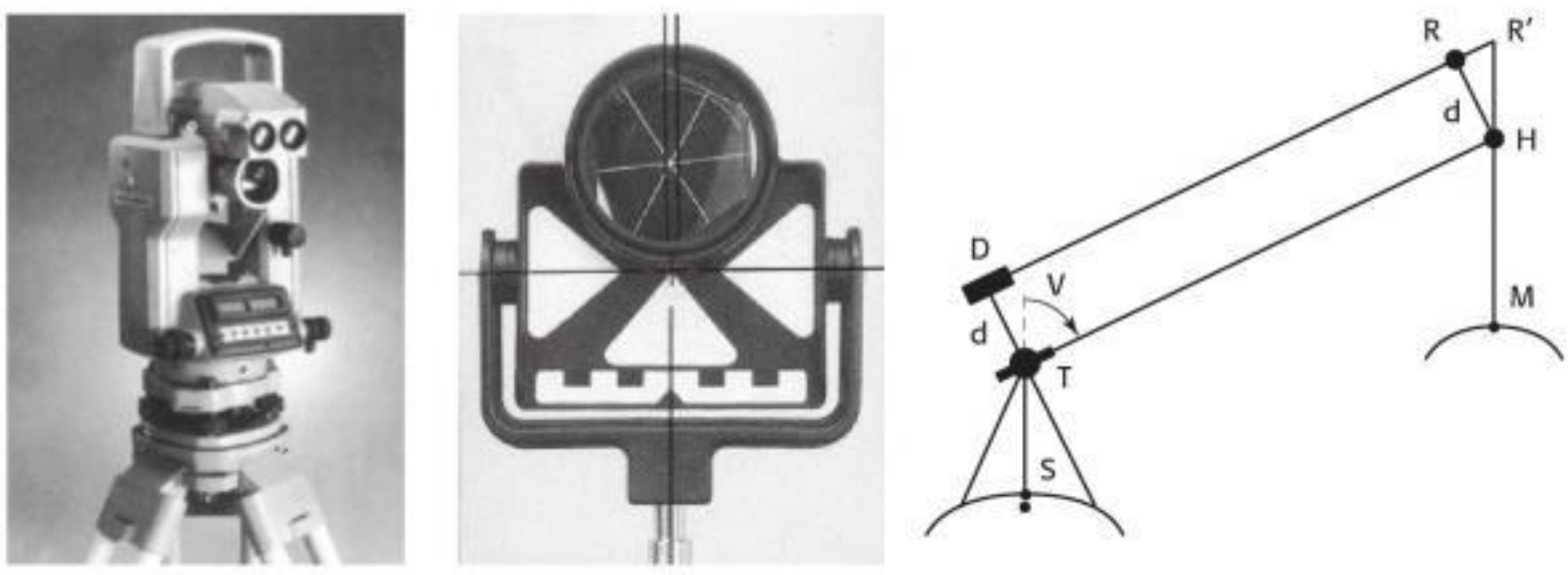


Figure 3.21. Lunette et distancemètre superposés.

Document Leica

Le décalage en hauteur d entre l'axe de l'émission-réception et l'axe optique parallèle, se retrouve entre le réflecteur R et le voyant de pointé H, la distance mesurée DR étant égale à la distance cherchée TH lorsque le prisme est basculé perpendiculairement à la lunette. Si le réflecteur n'est pas basculé, la distance mesurée DR' doit être corrigée quand la visée est nettement inclinée : $RR' = -d \cdot \text{cotan}\,\hat{V}$ (négatif si $\hat{V} < 100$ gon, positif si $\hat{V} > 100$ gon).

Les distancemètres modulaires complètent surtout les anciens théodolites optiques ; certains modèles sont coaxiaux avec la lunette.

3.2.4.2 Intégrés

Le distancemètre est dans la lunette du théodolite, l'axe optique étant aussi l'axe de l'émission-réception, ce qui supprime toute correction de décalage.

3.2.4.3 Lasers pulsés sans réflecteur

L'instrument envoie pendant une fraction de seconde des centaines, voire des milliers, d'impulsions laser sur une cible qui en réfléchit une partie vers l'émetteur ; la distance affichée est la moyenne de centaines, voire de milliers, de mesures du temps de parcours aller-retour d'une impulsion. Cette *technologie* : temps de mesure très court, haute précision, mesures sur objets en mouvement et surtout *mesures sans réflecteur*, est actuellement mise en œuvre, en topographie, sur des distancemètres ainsi que sur des matériels spécifiques parmi lesquels :

– *les jumelles laser* de classe 1 norme européenne EN 60825, laquelle définit la plus haute sécurité oculaire : Vector-Leica (figure 3.22), portée maximum 2500 m, précision 2 m environ, équipées d'un compas magnétique et d'un clinomètre à affichage électronique permettant le positionnement dans les trois dimensions de la longueur mesurée ; le Lem 300 Geo, société Jenoptik, portées plus petites ;

Figure 3.22. Jumelles laser.

Document Leica

– le *lasermètre*, laser de classe 2 qui interdit de regarder dans le faisceau visible. Le Disto™ de Leica (figure 3.23) par exemple, particulièrement apprécié en levé d'intérieur, porte à plus de 100 m avec une précision de quelques millimètres ; saisie, organisation, traitements et stockage des données par clavier alphanumérique, connectable à tout PC ;

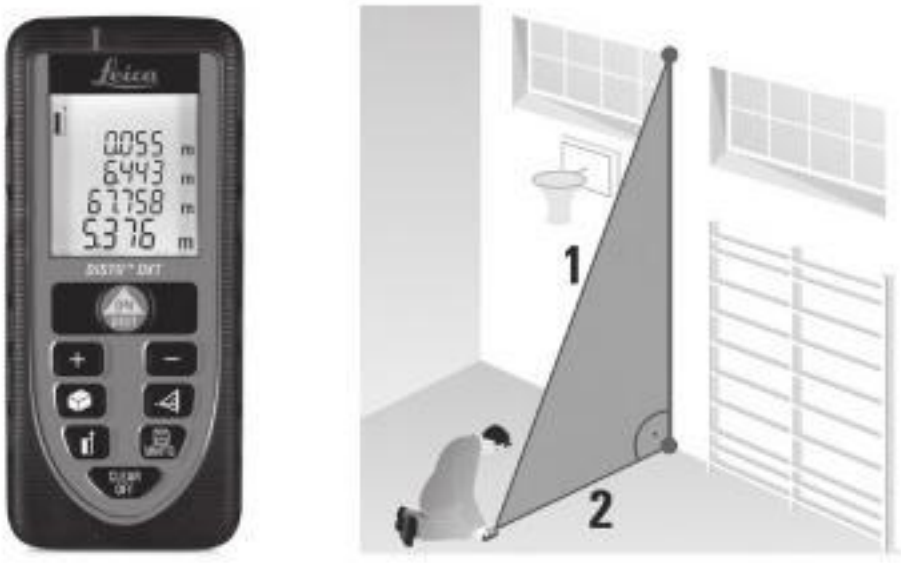


Figure 3.23. Disto™.

Document Leica

– les *tachéomètres électroniques* à visée laser (§7.3.1)

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Un niveau automatique lit sur la mire un code-barres et affiche la hauteur depuis le point sur lequel repose le base de la mire (zéro) jusqu'à l'axe optique horizontal ; il affiche aussi la distance horizontale : niveau-mire (figure 4.7).

Cette lecture automatique, sûre, rapide, directement enregistrable sur support informatique, ne peut se faire qu'avec un niveau préalablement calé à l'aide de la nivelle sphérique, et suppose un éclairage suffisant de la mire.

Aux erreurs du nivellement direct (§ 4.1.8) peut s'ajouter une erreur parasite affichant une lecture de hauteur alors que l'axe optique passe sous la mire ; en nivellement de très haute précision, l'erreur de réfraction sur le bas de la mire peut entacher la mesure.

Les niveaux numériques, qui peuvent être motorisés, permettent le *nivellement automatique* : saisie suivi du traitement informatique des cheminements (§ 4.1.4), points de détails, implantations, auscultations d'ouvrage.

4.1.3 Dénivelée élémentaire

4.1.3.1 Points en dessous du plan de visée

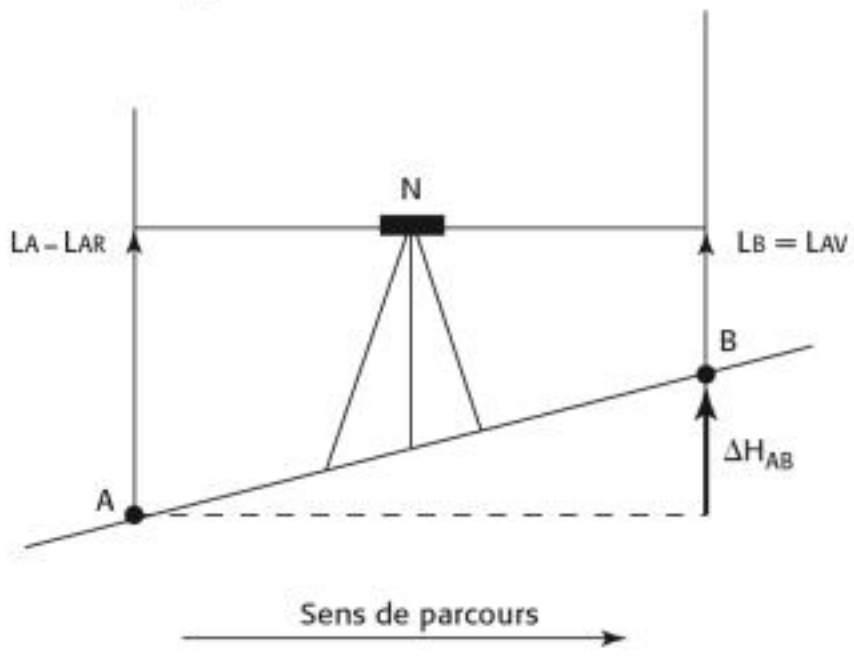


Figure 4.8. Dénivelée.

Le niveau étant en station en N à égalité de portée de A et B (figure 4.8), calé avec la nivelle sphérique, l'opérateur pointe la mire en A par exemple, cale la nivelle torique ou vérifie que le compensateur est en suspension libre, lit la hauteur de mire L_A ; les lectures supplémentaires aux deux traits stadimétriques permettent le contrôle et la mesure de la portée.

Après quoi, le porte-mire se déplace au point B et l'opérateur lit L_B dans les mêmes conditions.

Comme en nivellement les points de mire sont en général nombreux, rarement matérialisés, sans désignation le plus souvent, l'opérateur les identifie à chaque station par rapport au sens de parcours de l'arrière vers l'avant, ici de A vers B.

La dénivelée dans le sens de parcours est donc la valeur algébrique : $\Delta H_{AB} = L_A - L_B$, notée de manière générale : $\Delta H = L_{AR} - L_{AV}$.

En cas de visées réciproques (figure 4.2), identifier soigneusement les lectures, L_A étant la lecture arrière, L_B la lecture avant, indépendamment des positions relatives du niveau et de la mire :

$$\Delta H_{AB} = \frac{(L_{A_1} - L_{B_1}) + (L_{A_2} - L_{B_2})}{2} \Rightarrow \Delta H = \frac{(L_{AR} - L_{AV})_1 + (L_{AR} - L_{AV})_2}{2}$$

Saisie manuelle et réductions des observations dans un carnet, ou saisie et traitement automatiques, selon le matériel utilisé.

Exemple

Points Nivelés	Lectures L_{AR}	Lectures L_{AV}	Dénivelées Δ_H	Portées AR AV	Altitudes H	Observations
Repère	2,149 170 1,979 m 1,808 171				196,251 m	Repère ABm3-65
			+ 0,836	34,1 m		
M		1,307 164 1,143 m 0,979 164		32,8	197,087	

4.1.3.2 Points au-dessus du plan de visée

Que l'on opère par égalité des portées ou par visées réciproques, la détermination de la dénivelée en grandeur et en signe selon le sens de parcours ne change pas, sous réserve *d'affecter le signe « moins » aux lectures qui correspondent à des points de mire placés au-dessus du plan de visée* (figure 4.9).

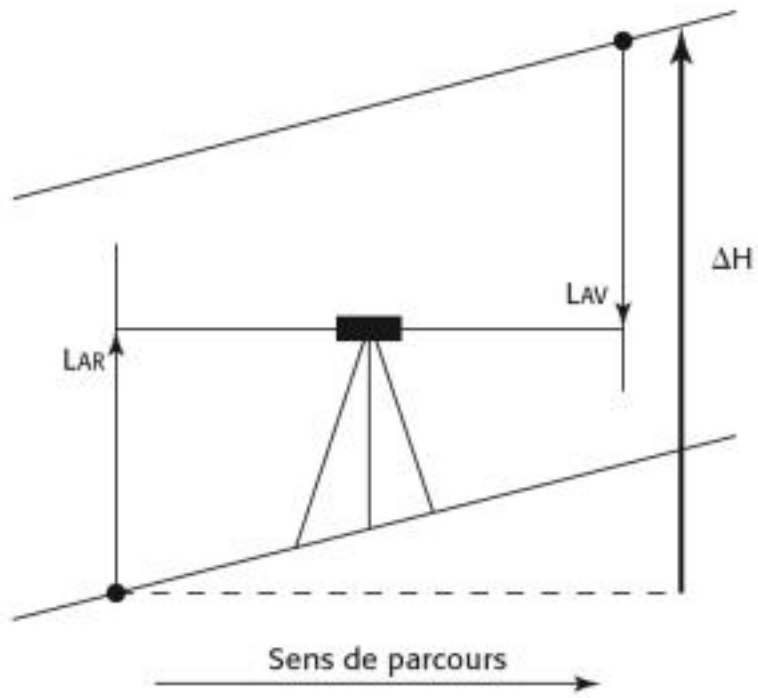


Figure 4.9. Point au-dessus du plan de visée.

$$\Delta H = |L_{AR}| + |L_{AV}| = L_{AR} - L_{AV}, \quad \text{avec } L_{AV} < 0$$

Le signe d'une lecture dépend uniquement de la position du point en-dessous ou au-dessus du plan de visée, pas du fait que la lecture soit arrière ou avant.

La formule générale : $\Delta H = L_{AR} - L_{AV}$ s'applique indifféremment aux altitudes positives et aux altitudes négatives rencontrées notamment en topographie souterraine.

Le niveau laser tournant automatique, avec détecteur laser coulissant sur canne ou sur mire, illustre bien la mesure d'une dénivelée élémentaire sur un chantier de BTP (figure 4.10).

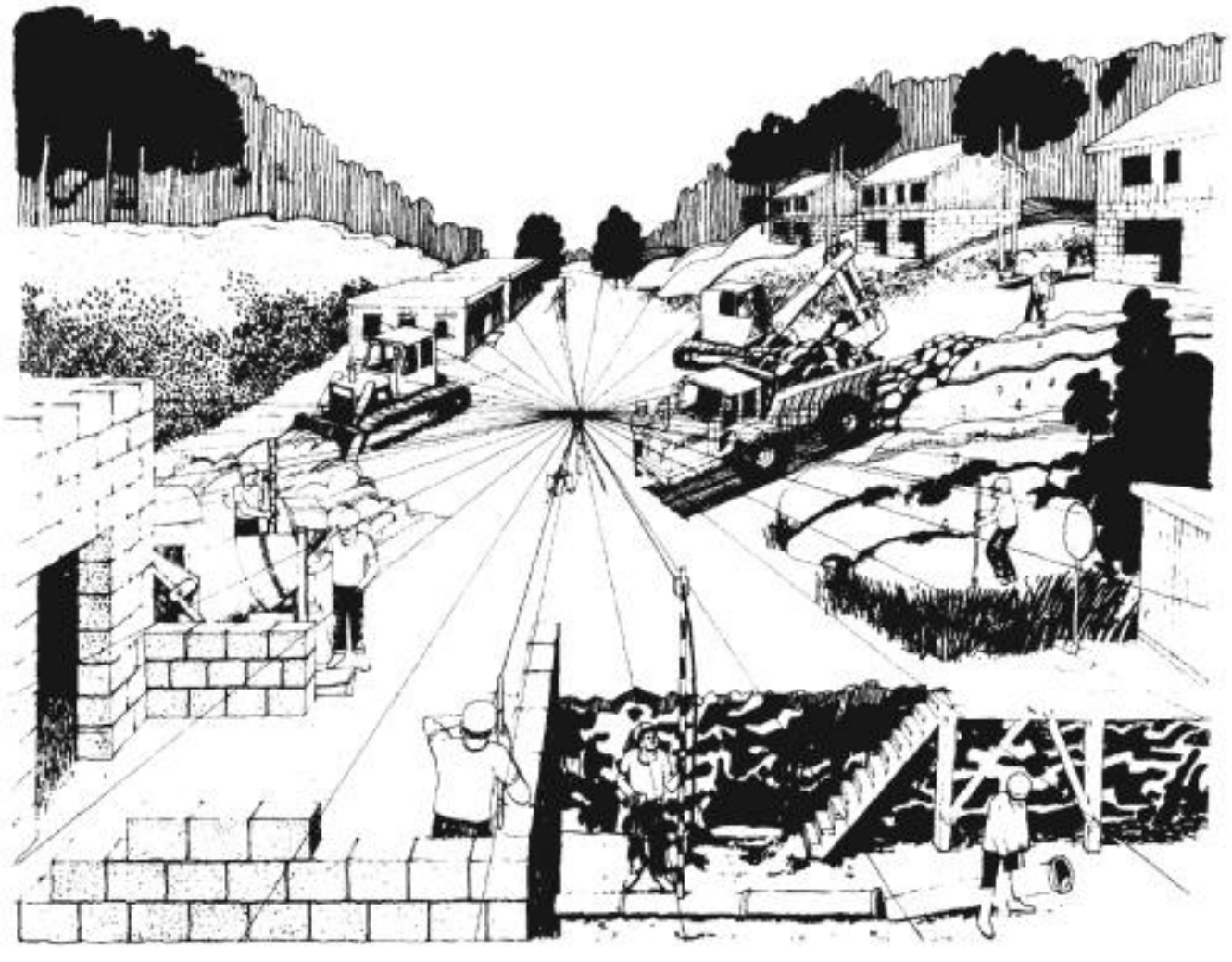


Figure 4.10. Niveau laser rotatif.

Document Spectra Précision

4.1.4 Cheminement encadré

4.1.4.1 Observations

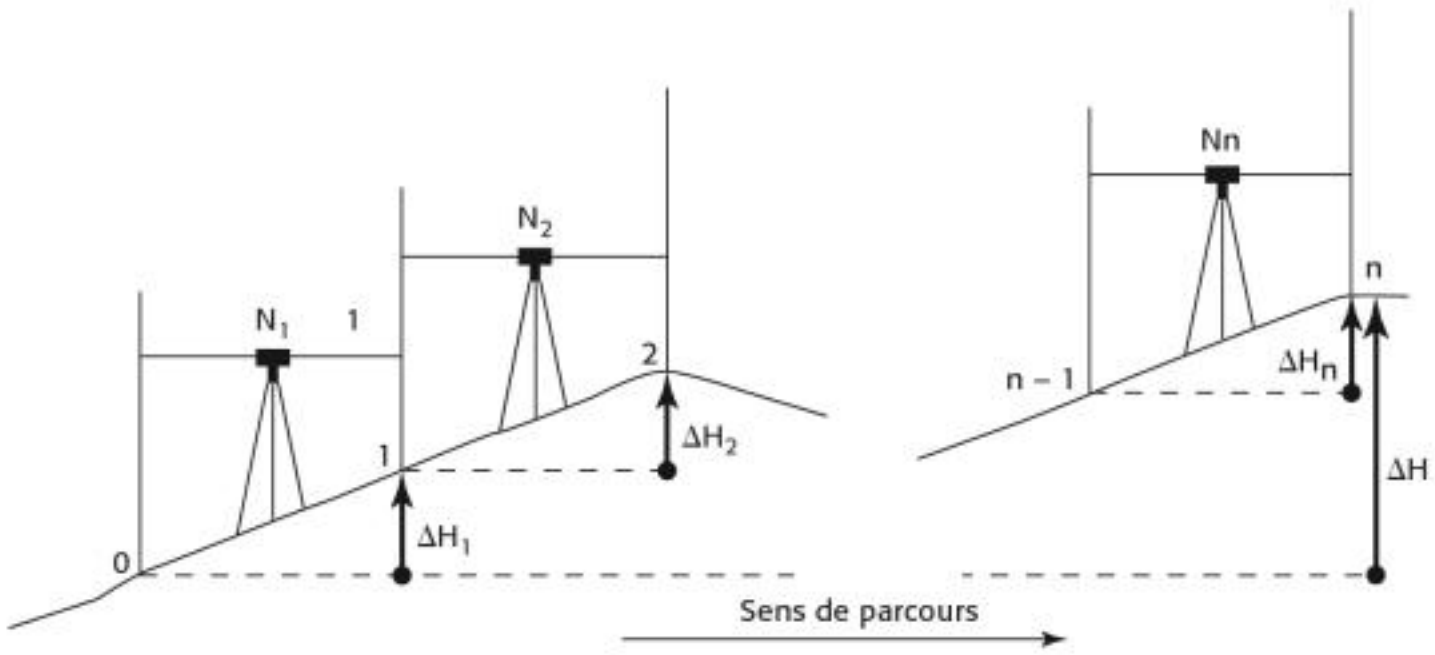


Figure 4.11. Cheminement de nivellement.

Lorsque les points de départ 0 et d'arrivée n sont situés de telle façon qu'une seule station de niveau ne suffise pas pour déterminer la dénivelée ΔH : éloignement, masques, dénivellations importantes, etc., décomposer la dénivelée totale en dénivelées élémentaires en cheminant sur les points intermédiaires : 1, 2, …, n – 1 (figure 4.11).

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

4.1.4.2 Calcul des altitudes

Contrôle des dénivelées

$$\begin{aligned} L_{AR0} - L_{AV1} &= \Delta H_1 \\ L_{AR1} - L_{AV2} &= \Delta H_2 \\ &\vdots \\ L_{ARi-1} - L_{AVi} &= \Delta H_i \\ &\vdots \\ L_{ARn-1} - L_{AVn} &= \Delta H_n \\ \hline \sum_{i=0}^{n-1} L_{ARi} - \sum_{i=1}^{n} L_{AVi} &= \sum_{i=1}^{n} \Delta H_i \end{aligned}$$

Fermeture - Tolérance

$$\begin{aligned} H_1 &= H_0 + \Delta H_1 \\ H_2 &= H_1 + \Delta H_2 \\ &\vdots \\ H_i &= H_{i-1} + \Delta H_i \\ &\vdots \\ H_n &= H_{n-1} + \Delta H_n \\ \hline H_n &= H_0 + \sum_{i=1}^{n} \Delta H_n \end{aligned}$$

Du fait des imprécisions des altitudes imposées H_0 et H_n, comme de celles des dénivelées, l'altitude du point n, ainsi calculée directement à partir de l'altitude de départ H_0 et de la somme algébrique des dénivelées, correspond à l'altitude approchée H_{n_a} proche de l'altitude connue H_n ; la formule opérationnelle s'écrit donc : $H_{n_a} = H_0 + \sum_{i=1}^{n} \Delta H_i$.

D'où *l'écart de fermeture algébrique* : $e_H = H_{n_a} - H_n$, dont la valeur absolue doit être strictement inférieure à la tolérance T_H pour autoriser la poursuite des calculs, cette dernière étant fonction de la précision des points d'appui (§ 1.4.3) et des mesures.

Les observations terminées, l'opérateur, sur le terrain, calcule l'écart de fermeture et le soumet à la tolérance ; en cas de dépassement, les observations sont reprises.

À noter que deux erreurs parasites d'observation, ou deux fautes de calculs opposées, + 1 m et – 1 m par exemple, commises sur deux dénivelées de même signe, peuvent passer inaperçues, la probabilité d'un tel événement étant toutefois négligeable.

Ajustement

Les altitudes connues de l'origine 0 et de l'extrémité n étant immuables, bien que probablement imparfaites, le calculateur est contraint d'annuler l'écart de fermeture en appliquant une correction c_H opposée de l'écart : $H_n = H_{n_a} + c_H \Rightarrow c_H = H_n - H_{n_a} = -e_H$.

En pratique, seule la correction est calculée du fait que sa valeur absolue, identique à celle de l'écart de fermeture, suffit pour vérifier que ce dernier est strictement inférieur à la tolérance.

L'altitude approchée Hn_a provenant de celle de départ H_0 non modifiable et des dénivelées mesurées toutes avec la même précision, l'*ajustement* consiste à répartir la correction c_H sur les différentes dénivelées proportionnellement aux portées, lesquelles conditionnent fortement la précision des hauteurs de mire lues ; en désignant par D_i la somme des portées arrière et avant de la station N_i, la correction c_{H_i} à appliquer en grandeur et en signe à la dénivelée ΔH_i vaut :

$$c_{H_i} = \frac{c_H \cdot D_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i}.$$

L'ajustement, mal nécessaire qui n'améliore pas les observations, est surtout une satisfaction de l'esprit, ce qui justifie l'arrondi des corrections partielles au millimètre, sous réserve que leur somme soit rigoureusement égale à la correction totale ; la correction totale peut aussi être répartie sur les différentes dénivelées proportionnellement à leur nombre, à leurs valeurs absolues, etc.

Contrôle des calculs en vérifiant que l'altitude du point d'arrivée, calculée de proche en proche depuis l'origine avec les dénivelées ajustées, est rigoureusement égale à l'altitude connue.

Les calculs sont faits dans le carnet des observations en cas de saisie manuelle des données ou traités par informatique en saisie automatique.

4.1.4.3 Algorithme

1) $\ell_2 - L = L - \ell_1$;

2) $\Delta H_i = L_{ARi-1} - L_{AVi}$;

3) $\sum_{i=0}^{n-1} L_{ARi} - \sum_{i=1}^{n} L_{AVi} = \sum_{i=1}^{n} \Delta H_i$;

4) $H_{n_a} = H_0 + \sum_{i=1}^{n} \Delta H_i$;

5) $c_H = Hn - Hn_a$;

6) $|c_H| < T_H$;

- -

7) $c_{H_i} = \dfrac{c_H \cdot D_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i}$;

8) $H_{i+1} = H_i + (\Delta H_{i+1} + c_{H_{i+1}})$.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

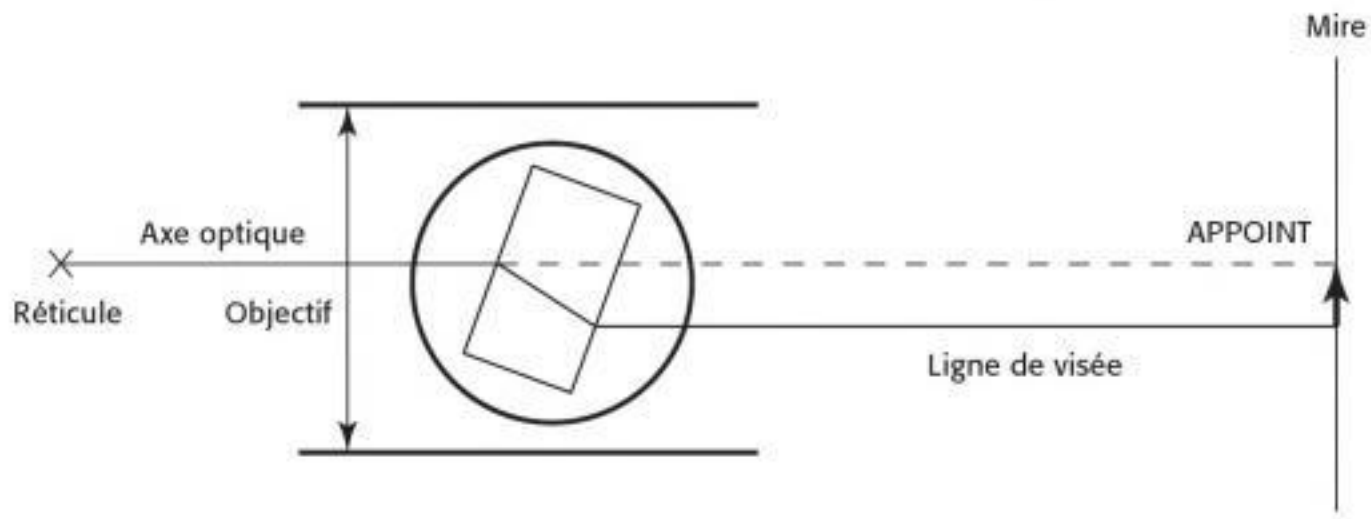


Figure 4.18. Micromètre d'objectif.

Document Leica

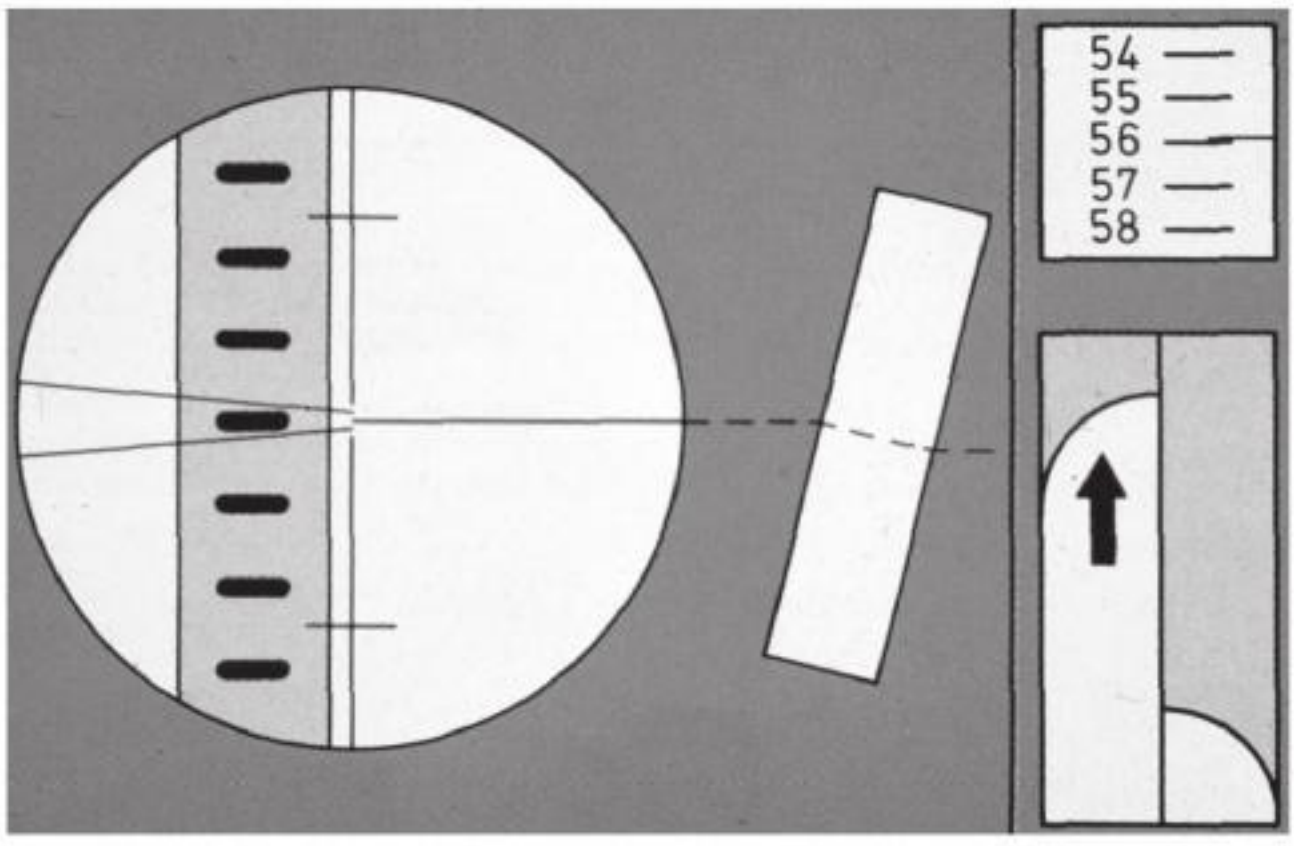


Figure 4.19. Pointé et lecture.

Document Leica

4.2.1.2 Mire invar à double échelle

Le ruban en invar, alliage acier-nickel dont le coefficient de dilatation thermique est extrêmement faible, porte deux échelles à traits dont la valeur d'échelon est égale à 1 cm (figure 4.20).

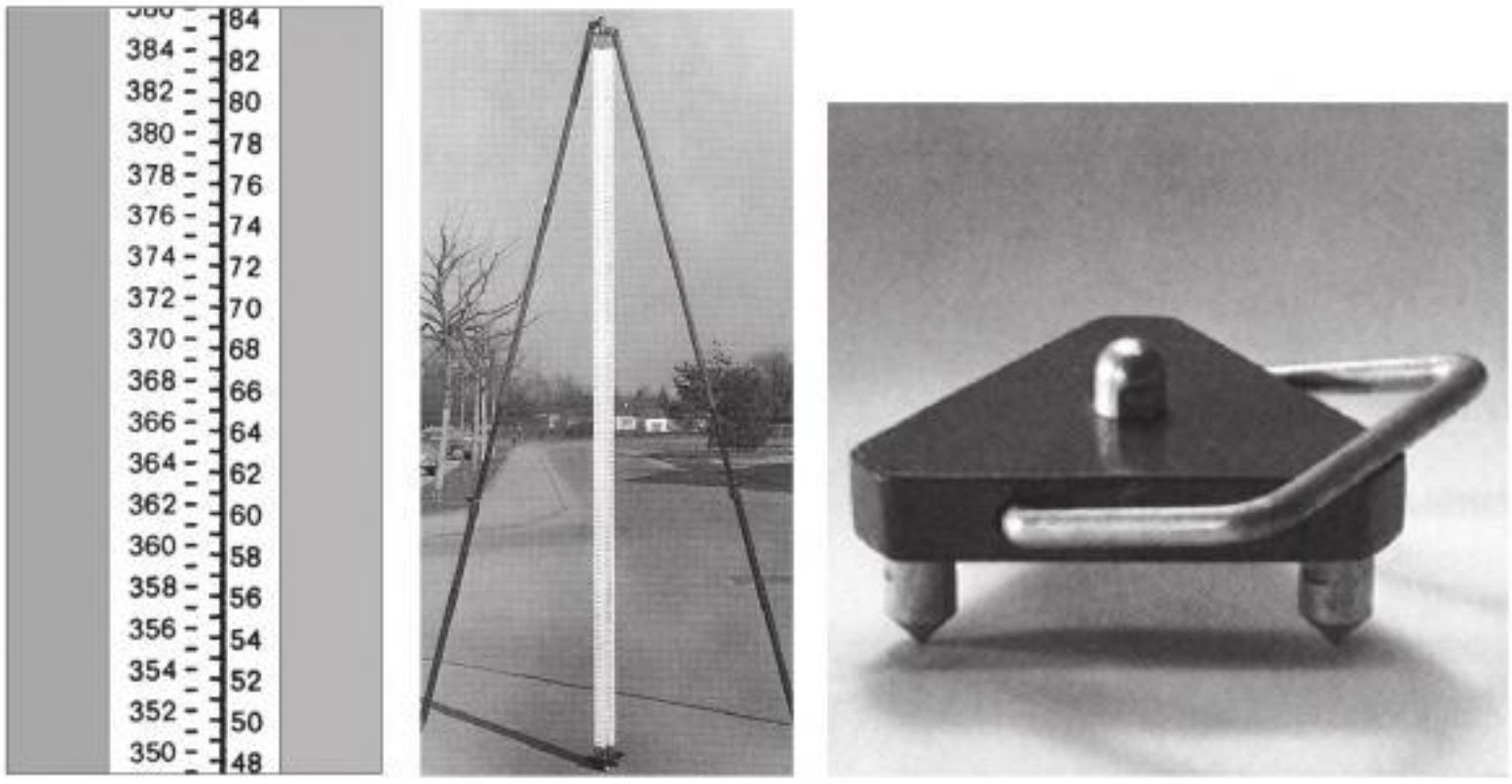


Figure 4.20. Mire à double échelle.

Document Leica

L'origine de l'échelle de droite est le talon de la mire, celle de l'échelle de gauche étant décalée d'un nombre difficile à additionner mentalement de manière à pouvoir contrôler les lectures. Le ruban est placé dans un profilé d'aluminium rigide, de telle sorte que les variations de ce dernier n'ont aucune influence sur le ruban invar. La mire est utilement équipée de contrefiches télescopiques et posée sur un socle lourd.

4.2.1.3 Niveaux automatiques

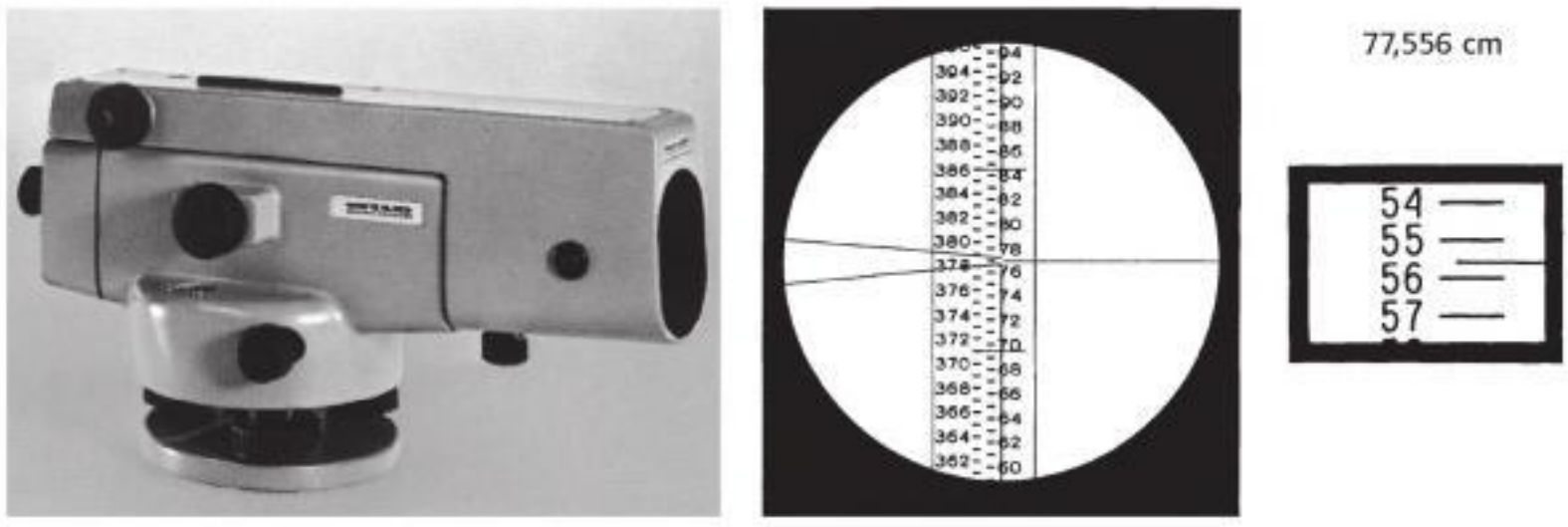


Figure 4.21. Lecture échelle 1.

Document Leica

Lunette de grossissement × 25 - × 30, sensibilité de la nivelle sphérique 8'/2 mm, précision de calage 0,2" - 0,3", micromètre d'objectif fixe ou amovible (figure 4.21), accessoires divers : prisme d'objectif à 90°, oculaires spéciaux, etc.

Les niveaux électroniques lisent avec une résolution de 0,01 mm une mire code-barres de 3 m divisée par interférométrie laser, technique qui, actuellement, offre le maximum de précision en matière de graduation.

4.2.2 Cheminement aller et retour

En général, il sert à mesurer la dénivelée entre le point de départ 0 du cheminement aller et le point d'arrivée n, sans souci des points intermédiaires.

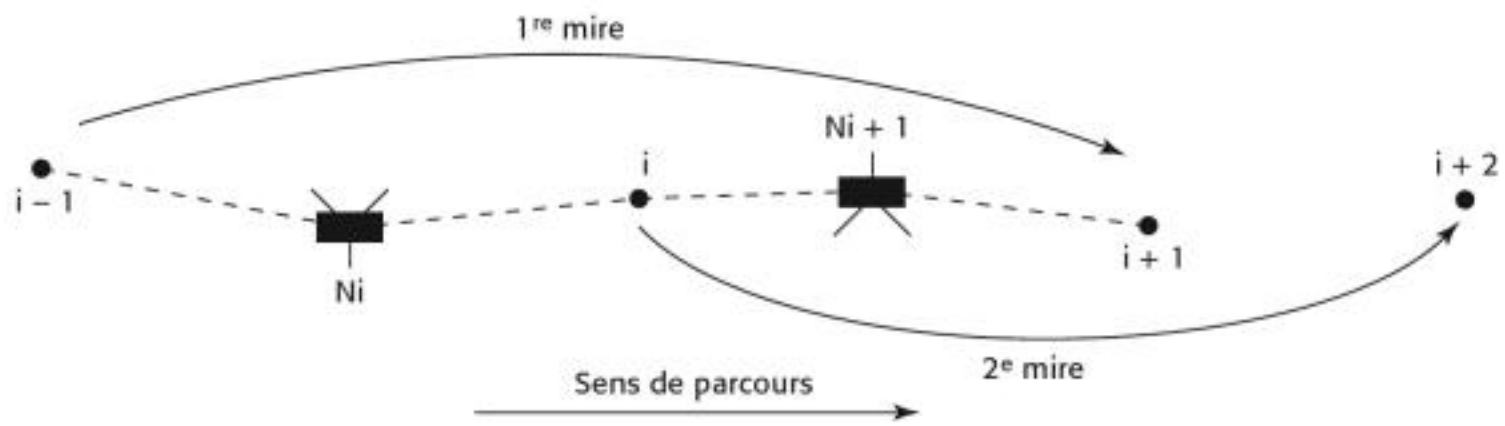


Figure 4.22. Aller et retour.

À la station Ni du cheminement aller (figure 4.22) l'opérateur effectue la lecture arrière sur une mire placée en i – 1 : pointé du coin niveleur et lecture des traits stadimétriques sur l'échelle 1 dont le zéro est au talon de la mire invar à double échelle, suivis du pointé et de la lecture de l'échelle 2 sans lire les traits stadimétriques ; lecture arrière et portée avec un niveau électronique. Après quoi, il vise une seconde mire placée sur le point suivant i, effectue la lecture avant et les lectures complémentaires de la même façon.

À la station suivante Ni + 1, la mire en i pivote sans quitter le point pour tenir lieu de mire arrière, celle située en i – 1 venant en i + 1 comme mire avant ; ainsi, chaque mire tient lieu à tour de rôle de mire arrière et de mire avant.

Portées de 35 m au maximum, égales au mètre près ; opérer au pas, avec un triple décamètre ou une ficelle ou encore en ajustant la portée avant à partir de la portée stadimétrique arrière ; à noter que les niveaux électroniques avec mire code-barres permettent d'assurer l'égalité des portées avec une très grande précision, pratiquement sans perte de temps.

La dénivelée de 0 à n est calculée par la formule : $\Delta H = \sum_{i=0}^{n-1} LAR_i - \sum_{i=1}^{n} LAV_i$.

Le cheminement retour de n vers 0 est observé dans les mêmes conditions, en passant éventuellement sur les mêmes points intermédiaires quand ils sont restés en place, « spit » par exemple.

Si T est la tolérance d'un cheminement, la tolérance de l'écart entre les valeurs absolues des dénivelées aller et retour est égale à $T\sqrt{2}$, celle de la moyenne des dénivelées à $\frac{T}{\sqrt{2}}$.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

4.4.3 Cheminements

Comme en nivellement direct ordinaire, ils peuvent être encadrés ou fermés ; les cheminements ouverts, contrôlés par les visées réciproques obligatoires, peuvent être tolérés.

Calculs en deux phases :

- d'abord, les dénivelées moyennes entre stations ;
- ensuite, les altitudes, ajustées comme en nivellement direct mais avec un calcul des tolérances différent ; la tolérance du cheminement vaut : $T = \sqrt{\sum T_i^2}$, T_i désignant les tolérances des dénivelées du point de départ et du point d'arrivée, *en plus* de celles des dénivelées.

Exemple

Calcul des altitudes des sommets du cheminement encadré 505 → 2006 (§ 5.3.3.2.) ; ajustement proportionnel aux valeurs absolues des dénivelées.

Points nivelés	ST	ΔT	Hp	ST + ΔT – Hp	T T $\sqrt{2}$	ΔH	$\frac{T}{\sqrt{2}}$	H
505	1,529 m	↓ – 18,670 m	1,30 m	– 18,441 m	2 cm			68,41 m
						↓ – 18,452 m	1,4 cm	
		↑ 18,298	1,30	+ 18,462	2,8	– 5 mm		
6 014	1,464							49,95
		↓ – 17,189	1,30	– 17,025	2			
						↓ – 17,016	1,4	
		↑ 16,763	1,30	+ 17,007	2,8	– 5		
6 015	1,544							32,93
		↓ – 10,887	1,50	– 10,843	1			
						↓ – 10,842	0,7	
		↑ 10,835	1,50	+ 10,840	1,4	– 3		
6 016	1,505							22,09
		↓ – 7,234	1,30	– 7,029	2			
						↓ – 7,038	1,4	
		↑ 6,868	1,30	+ 7,047	2,8	– 2		
6 017	1,479							15,05
		↓ – 6,933	1,30	– 6,754	2			
						↓ – 6,751	1,4	
		↑ 6,509	1,30	+ 6,747	2,8	– 2		
6 018	1,538							8,29
		↓ – 0,215	1,30	+ 0,023	2			
						↓ + 0,012	1,4	
		↑ – 0,251	1,30	– 0,001	2,8			
6 019	1,550							8,31
		↓ 18,242	2,15	+ 17,642	1			
						↓ + 17,649	0,7	
		↑ – 17,852	1,30	– 17,655	1,4	– 5		
2 006	1,497							25,95
		↓						
						↓		
		↑						
		↓ Tolérances aux extrémité : 5 mm				C_H = – 22 mm		H_{m_3} = 25,972
						T_H = 3 cm		

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

5.2.1.3 Résolution du système d'équations normalisées

La matrice N est symétrique et tous les termes principaux sont situés à proximité de la diagonale principale ; mais comme les autres termes ne sont pas nuls, elle ne peut pas bénéficier des méthodes particulières de résolution réservées à des matrices-bandes. D'autre part, les inconnues dX, dY et dZ rangées dans le vecteur V sont très petites car elles représentent les écarts entre les coordonnées définitives et approchées. Il en résulte que la résolution d'un tel système doit être effectuée avec un algorithme qui garantit la précision des résultats.

Ce système linéaire et symétrique est résolu avec une très grande précision par la méthode de Cholesky, qui substitue à la matrice N le produit d'une matrice triangulaire supérieure H par une matrice triangulaire inférieure, la seconde ayant pour particularité d'être la transposée de la première.

$N \cdot X = -C$ est remplacé par : $H^t \cdot H \cdot \mathbf{X} = -C$; avec : $Y = H \cdot X$, on déduit d'abord Y avec : $H^t \cdot Y = -C$, puis X avec : $H \cdot X = Y$.

On obtient ainsi les valeurs optimales dX, dY, dZ pour chaque point du réseau, permettant à celui-ci de « coller » au mieux avec les observations.

La détermination des coefficients des relations d'observation est fonction de la nature de la compensation recherchée ; si la relation n'a pas la forme d'une équation linéaire, le développement de Taylor, mis en œuvre avec des valeurs approchées des inconnues, permet la linéarisation.

5.2.2 Transformation d'Helmert

La transformation d'Helmert (géodésien allemand 1843-1917) est une similitude permettant de passer d'un système de coordonnées à un autre. En topographie, elle est généralement utilisée pour passer d'un système local à un système Lambert par exemple.

Elle est composée d'une rotation, d'une translation et d'une homothétie ou changement d'échelle définis à partir de points de calage (deux au minimum), connus dans le système de départ et d'arrivée et calculés de manière à minimiser la somme des carrés des distances Di entre les points connus et ces mêmes points transformés. Elle s'apparente donc à une compensation par moindres carrés.

Soient (X, Y) les coordonnées dans le système d'arrivée et (x, y) celles du système de départ.

Si k est le facteur de mise à l'échelle, généralement proche de 1, θ l'angle de rotation et (P,Q) le vecteur de translation, les coordonnées (X, Y) sont calculées de la manière suivante :

$$\begin{aligned} X &= k \times \cos\theta \times x + k \times \sin\theta \times y + P \\ Y &= -k \times \sin\theta \times x + k \times \cos\theta \times y + Q \end{aligned}$$

En posant : $A = k \times \cos\theta$ et $B = k \times \sin\theta$, on obtient :

$$\begin{aligned} X &= A \times x + B \times y + P \\ Y &= A \times y - B \times x + Q \end{aligned}$$

En théorie, les paramètres A, B, P et Q sont calculables à partir de 2 points de calage seulement. En pratique, il est préférable d'en utiliser davantage pour plus de précision et pour l'application des moindres carrés ; les paramètres sont calculés de manière à ce $\sum Di^2$ que soit minimum.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Un cheminement est *décliné* lorsque les gisements de ses côtés sont mesurés directement sur le terrain avec un théodolite décliné. Étant donné la faible précision de l'écart-type d'un azimut magnétique et le fait que l'erreur commise n'affecte qu'un côté sans répercussion sur les suivants, ce procédé peut éventuellement présenter de l'intérêt pour un cheminement comportant de nombreux côtés courts ; en dehors de rares travaux forestiers, le cheminement décliné n'est plus utilisé.

Le canevas polygonal, constitué de cheminements planimétriques goniométriques, est souvent un canevas intermédiaire de lignes entre les points d'appui connus et le levé des détails.

5.3.2 Cheminement ouvert

5.3.2.1 Observations

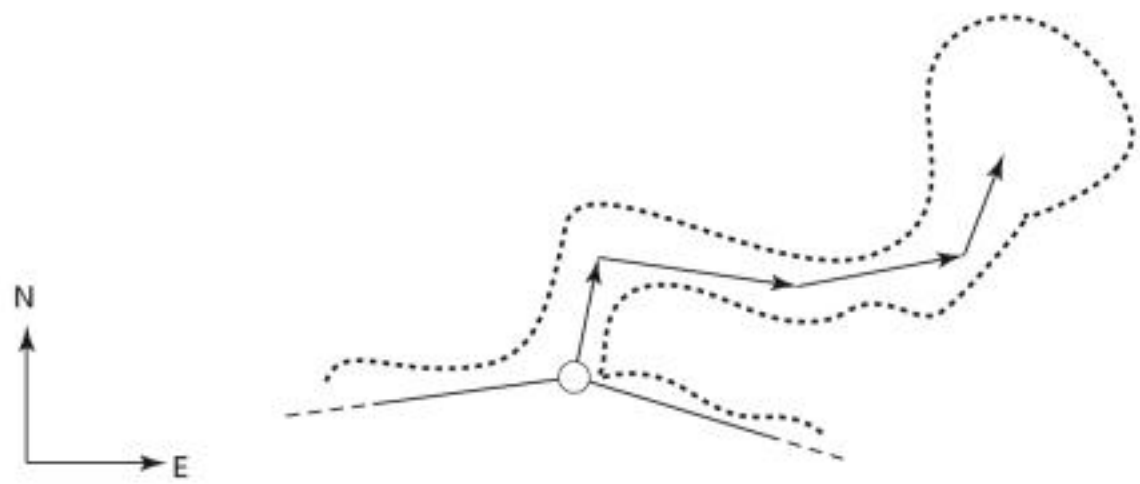


Figure 5.1. Ligne polygonale.

Le cheminement ouvert, ou ligne polygonale ou cheminement en antenne, est une ligne brisée orientée (figure 5.1) définie géométriquement par :

- une origine connue en coordonnées rectangulaires, dans un repère orthonormé local (x,y) ou un système de représentation national (E, N) : Lambert ou UTM par exemple ;
- une direction de référence à l'origine, dont le gisement est connu ;
- les angles azimutaux des côtés successifs, y compris celui à l'origine entre la direction de référence et le premier côté ;
- les longueurs des côtés réduites au système de projection ou au minimum à l'horizontale si le calcul est fait dans un repère orthonormé local.

Les angles sont mesurés avec un théodolite, les distances au distancemètre.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Pour, d'une part, respecter au mieux des exigences du terrain les caractéristiques souvent contradictoires de proximité, tension et homogénéité, et d'autre part, fixer la filiation ou ordre chronologique des calculs en l'absence de calcul en bloc, le topographe distingue :

- les *cheminements principaux* qui relient deux points de canevas d'ensemble ou encore un point de canevas d'ensemble et un point nodal principal ;
- les *cheminements secondaires*, c'est-à-dire tous les autres, qui s'appuient sur les précédents et sont donc calculés après les cheminements principaux ;
- les *points nodaux et cheminements nodaux*, principaux ou secondaires.

La distinction traditionnelle entre cheminements principaux et secondaires présente l'intérêt de définir clairement l'ordre hiérarchique de calcul des cheminements.

5.3.7.2 Désignation et matérialisation

Le topographe établit un *canevas de polygonation* (figure 5.23), qui figure les cheminements, les points nodaux, les désignations des sommets et le sens de calcul de chaque cheminement ; tracer en rouge les cheminements principaux, en bleu les cheminements secondaires par exemple.

Parmi les multiples possibilités de désignation, la DGI prescrit :

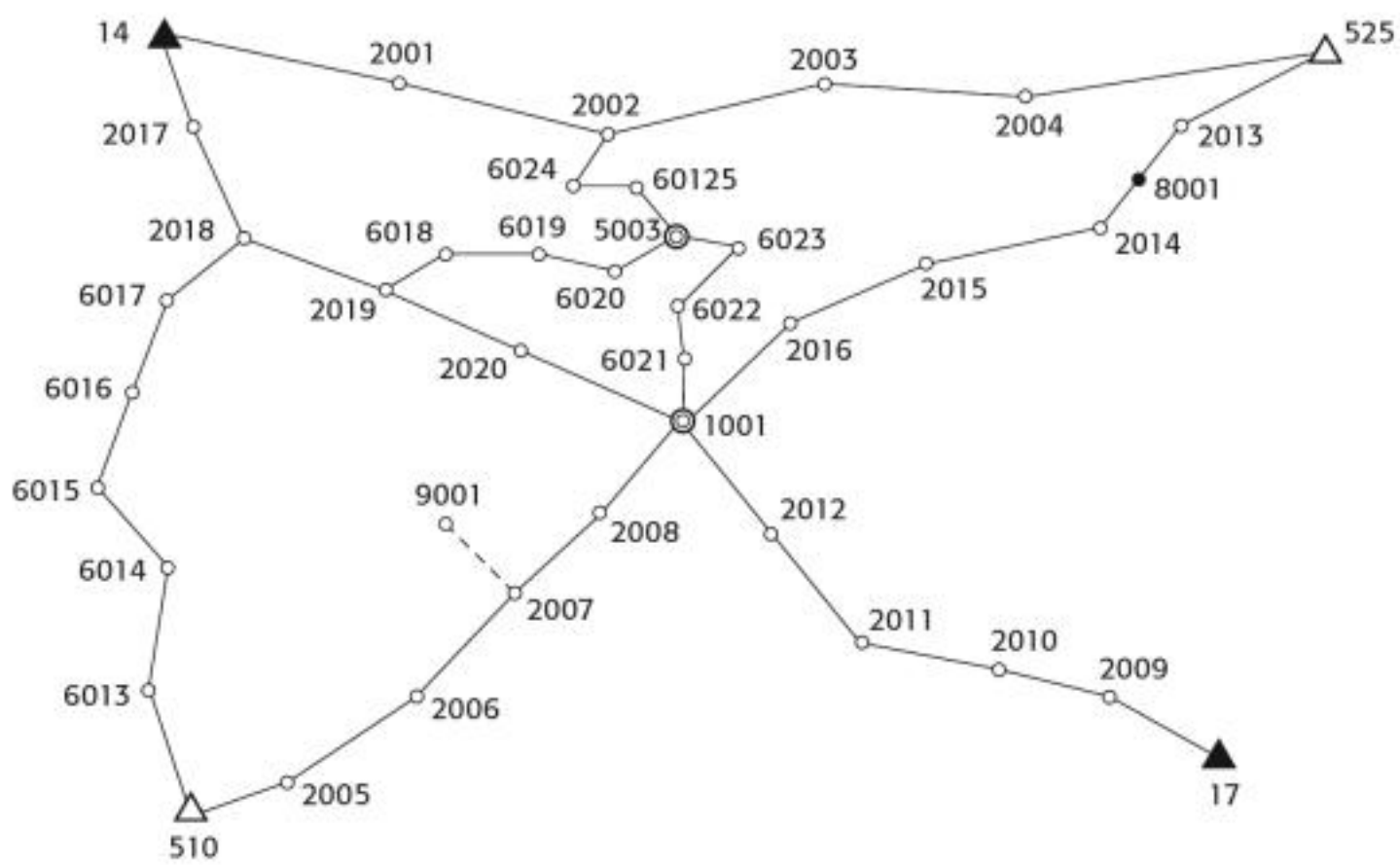


Figure 5.23. Canevas de polygonation.

- stations de polygonation principale :
  - points nodaux principaux 1001 à 1999 (Série 1000),
  - stations ordinaires 2001 à 4999 (Séries 2000, 3000, 4000) ;
- stations de polygonation secondaire ;
  - points nodaux secondaires 5001 à 5999 (Série 5000),
  - stations ordinaires 6001 à 7999 (Séries 6000 et 7000) ;

Dans un même cheminement, les numéros se suivent dans l'ordre naturel des nombres dans le sens de calcul ; représentation par un petit cercle pour les stations ordinaires, deux cercles concentriques pour les points nodaux.

– stations auxiliaires ;
  - stations alignées 8001 à 8999 (Série 8000) ; distances mesurées aux deux stations de cheminement qui l'encadrent,
  - stations lancées 9001 à 9999 (Série 9000).

Les sommets de polygonation matérialisés durablement, points naturels et points bornés, doivent être choisis parmi les cheminements principaux et répartis de façon homogène sur le chantier à la densité minimum de 5 points au km^2.

Le mode de matérialisation dépend de la nature du sol :

– terre meuble : borne granit avec croix et repère, scellée dans un massif bétonné de quelques décimètres de côté ;
– sol dur et compact : borne à ancrage à tête granit ou polymérisée ;
– asphalte et bitume : clou d'arpentage, cornière dans un angle de bordure de trottoir ;
– béton : spit, repère chevillé-vissé ;
– rocher : gravure au burin.

Fiche signalétique autorisant un rétablissement éventuel sans observations nouvelles.

Les sommets provisoires sont le plus souvent des piquets bois ou des pointes métalliques.

5.3.8 Observations et calculs

Angles polygonaux mesurés avec une paire de séquences de préférence, distances électroniques, traitements numériques par calculs hiérarchisés : réseau principal puis réseau secondaire, ou calcul en bloc ; ajustement proportionnel aux distances ou par moindres carrés.

5.3.9 Centrage forcé

Le centrage forcé est mis en œuvre par la méthode des trois trépieds qui consiste à mesurer les angles azimutaux d'un cheminement aéroporté sur les têtes de trépieds, véritable ligne polygonale sans commune mesure géométrique avec l'amalgame hétéroclite d'angles recentrés à chaque sommet sur les points au sol (figure 5.24).

Figure 5.24. Cheminement à centrage forcé.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

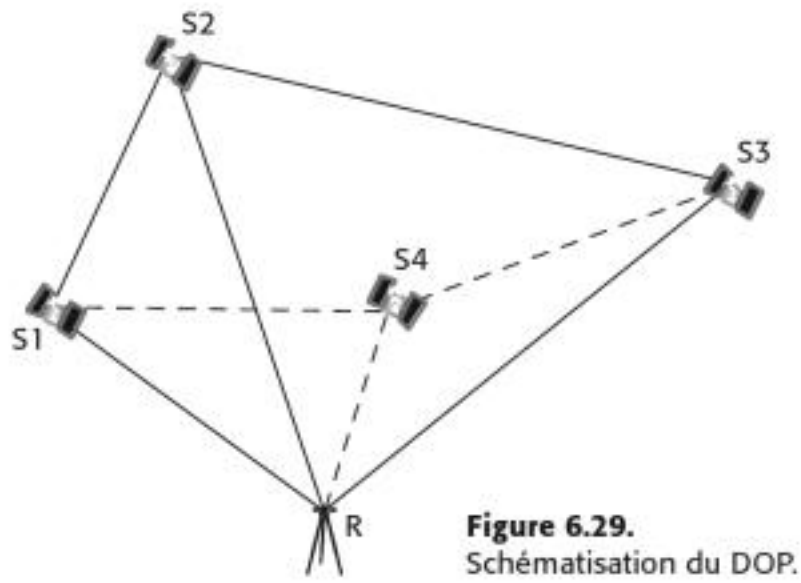


Figure 6.29.
Schématisation du DOP.

Le DOP est une grandeur qui varie de 1 à $+\infty$. Avec des couvertures de 5 à 6 satellites, le PDOP est généralement inférieur à 5, seuil de tolérance fixé dans le cadre d'observations en statique ou cinématique.

6.12.2 Redondance

Comme en topographie traditionnelle, et quelle que soit la méthode utilisée, la redondance des observations est fondamentale.

En rayonnement, la redondance est obtenue par les déterminations multiples d'un point sur lequel convergent plusieurs lignes de base ayant des origines différentes.

La réoccupation permet :

- de contrôler la mise en station afin de détecter les fautes (centrage, lecture de hauteur) ;
- d'améliorer la précision car la géométrie de la constellation varie à chaque occupation. En effet, ces déterminations doivent être indépendantes. Comme la constellation GNSS est la même chaque jour à 4 minutes près, une même ligne de base observée à intervalle d'une journée sera entachée des mêmes erreurs systématiques ; la précision externe de cette ligne de base sera donnée par des sessions d'observation à différents moments de la journée.

On définit le facteur de redondance par la formule empirique : $F = S \times (R-1) / (N-1)$ où S est le nombre de sessions, R le nombre de récepteurs, N le nombre de points stationnés.

D'après cette définition, il ne peut y avoir redondance sur une seule session d'observation, car $S = 1$, $R = N \Rightarrow F = 1$.

Cas d'un rayonnement sur 2 pivots avec 2 récepteurs :

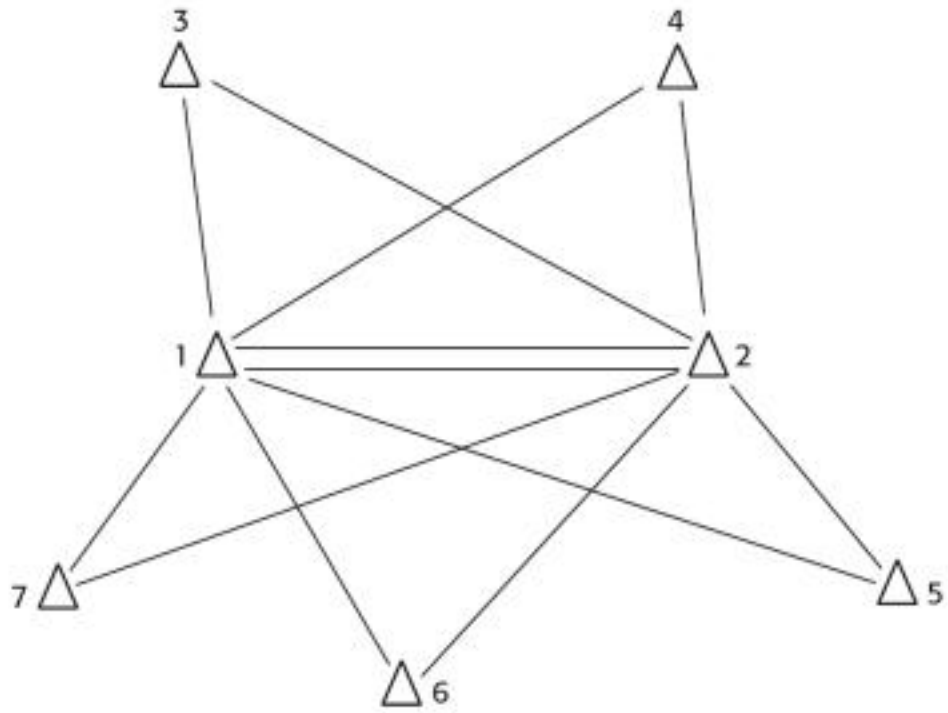


Figure 6.30. Lignes de base d'un rayonnement sur deux pivots.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Éléments sous droits d'auteur

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Continuer ainsi par tangentes égales successives pour implanter les points M_2, M_3, ..., M_i à intervalles égaux ; cette méthode, à l'encontre de la précédente, *permet de rester constamment au voisinage de l'arc* et par conséquent de travailler dans des espaces étroits : galeries, tranchées, couverts denses, etc.

7.4.3.4 Intersection

Deux opérateurs, à partir de 2 stations différentes, procèdent simultanément à l'ouverture d'un angle azimutal et définissent chacun un plan vertical de visée. À l'intersection des deux plans de visée, procéder au piquetage en déplaçant un signal vertical par approximations successives jusqu'au moment où il se trouve dans les 2 plans.

Plusieurs cas sont envisageables, exploitant les propriétés de l'arc capable (figure 7.39) :

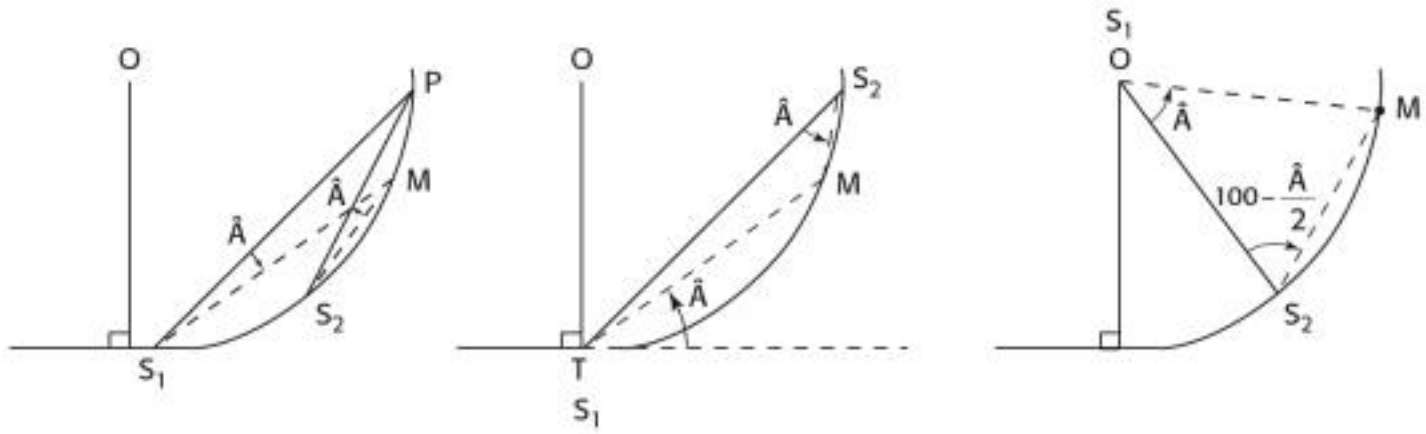


Figure 7.39. Implantation d'un arc de cercle par intersection.

– *S1 et S2 sur le cercle :*
  - visée de référence sur un point P quelconque du cercle ;
  - ouverture du même angle $\hat{A}$.

– *Station S1 au point de tangence T, S2 sur le cercle :*
  - référence sur tangente, ouverture d'un angle $\hat{A}$ quelconque ;
  - de S_2 référence sur S_1, ouverture de $\hat{A}$.

– *Station S1 au centre, S2 sur le cercle :*
  - de S_1 référence sur S_2, ouverture de $\hat{A}$;
  - de S_2 référence sur S_1, ouverture de : $100 - \frac{\hat{A}}{2}$.

Mise en œuvre délicate, résultat d'autant meilleur que les visées d'intersection forment un angle proche de l'angle droit.

7.4.3.5 Raccordement circulaire double

Publication de M. d'Ocagne, ingénieur des ponts et chaussées, chef du service des cartes (1908).

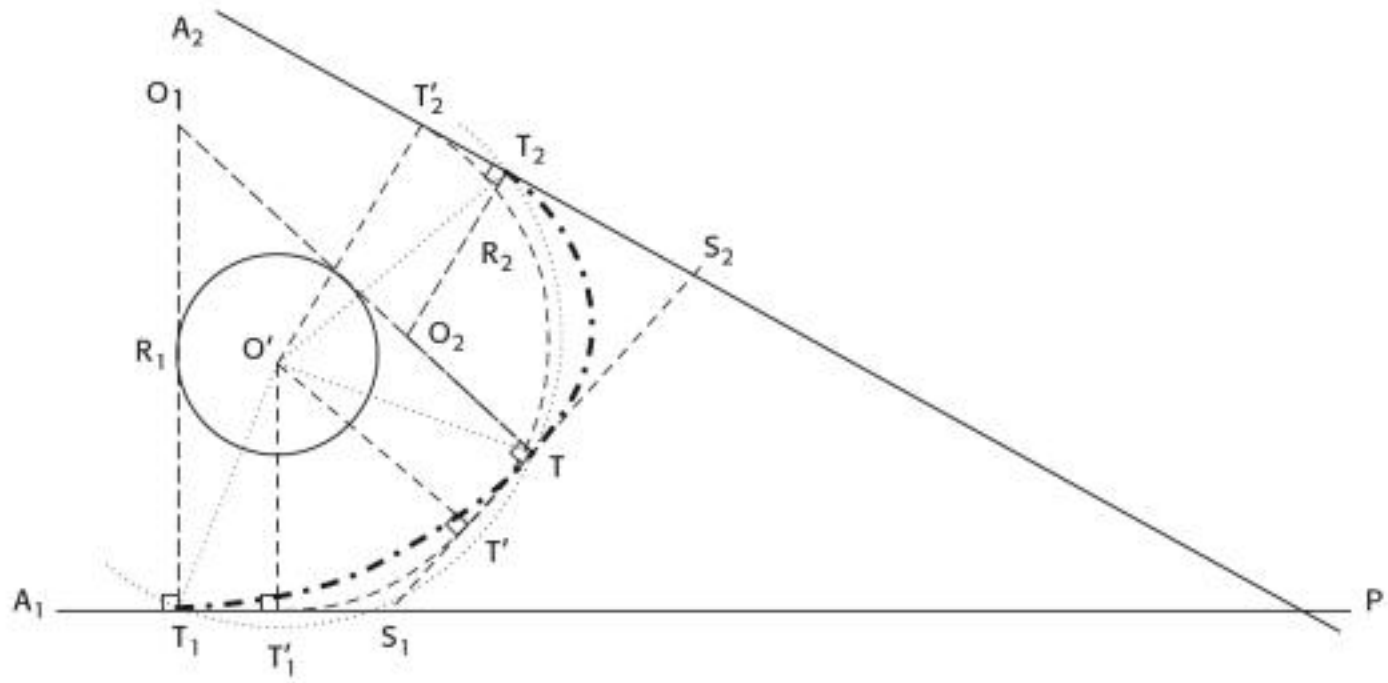


Figure 7.40. Cercles-lieux géométriques du raccordement circulaire double.

Si les 2 alignements A_1P et A_2P doivent être raccordés de telle manière que *les tangentes PT1 et PT2 soient inégales*, points T_1 et T_2 imposés par exemple, le raccordement circulaire est évidemment impossible.

Le raccordement circulaire double se compose de 2 cercles : (O_1 , R_1) tangent en T_1 à A_1P et (O_2 , R_2) tangent en T_2 à A_2P, tangents entre eux au point T, les centres O_1, O_2 et le point de tangence T des 2 cercles étant naturellement alignés.

La tangente commune aux 2 cercles en T coupe A_1P en S_1 et A_2P en S_2.

Le cercle de centre O', exinscrit dans l'angle $\hat{P}$ du triangle PS_1S_2, est tangent aux 3 côtés en T', T'_1, T'_2 et l'on peut écrire :

$$S_1T_1 = S_1T \qquad S_2T_2 = S_2T$$
$$S_1T'_1 = S_1T' \qquad S_2T'_2 = S_2T'$$

$$S_1T_1 - S_1T'_1 = S_1T - S_1T'$$
$$T_1T'_1 = TT' \qquad T_2T'_2 = TT'$$

Or :
$$PT_1 = PT'_1 + T_1T'_1 = PT'_1 + TT'$$
$$PT_2 = PT'_2 - T_2T'_2 = PT'_2 - TT'$$

$$PT_1 - PT_2 = 2TT' \qquad \Rightarrow TT' = T_1T'_1 = T_2T'_2 = \frac{PT_1 - PT_2}{2} = \text{Constante}$$

Par conséquent :

- les triangles rectangles $O'T'_1T_1$, $O'T'T$, $O'T'_2T_2$ étant égaux, *le cercle-lieu géométrique du point de tangence T des deux arcs de raccordement* est le cercle de centre O' défini par $PT'_1 = PT'_2 = \frac{PT_1 + PT_2}{2}$, de rayon $O'T_1 = O'T = O'T_2$;

- le *cercle-enveloppe de la ligne des centres* O_1O_2T est le cercle de centre O' et de rayon $TT' = T_1T'_1 = T_2T'_2 = \frac{PT_1 - PT_2}{2}$;
- le *cercle-enveloppe de la tangente commune aux deux cercles en T* est le cercle de centre O' et de rayon $O'T'_1 = O'T' = O'T''_2$.

Dans le cas fréquent où les points de tangence T_1 et T_2 sur les alignements sont imposés, le choix d'une solution, parmi une infinité, peut être fait en déterminant sur un graphique un paramètre qui définit entièrement la géométrie de la figure, par exemple la position du point de tangence T dans le cas d'un passage obligé.

Une fois implantés les points T_1 et T_2, piqueter les points de chaque arc $\widehat{T_1T}$ et $\widehat{T_2T}$ comme des raccordements circulaires, la double détermination de T offrant un contrôle.

7.4.4 Clothoïde

7.4.4.1 Caractéristiques géométriques et formules

Le tracé en plan d'une route devant permettre d'assurer de bonnes conditions de sécurité et de confort à l'usager, l'entrée d'un virage ne peut être instantanée car la force centrifuge apparaîtrait brusquement au moment où le véhicule passerait de l'alignement à l'arc de cercle ; de même, le profil en travers « en toit » de l'alignement ne peut se transformer brutalement en profil déversé de virage. Pour ces raisons, l'alignement et le cercle, ou deux cercles de concentricités opposées, sont raccordés par une *courbe à courbure progressive* (figure 7.41), le plus souvent une clothoïde, dont le rayon R_V décroît régulièrement de l'∞ au point de tangence O avec l'alignement, à la valeur R au point de tangence P avec le cercle.

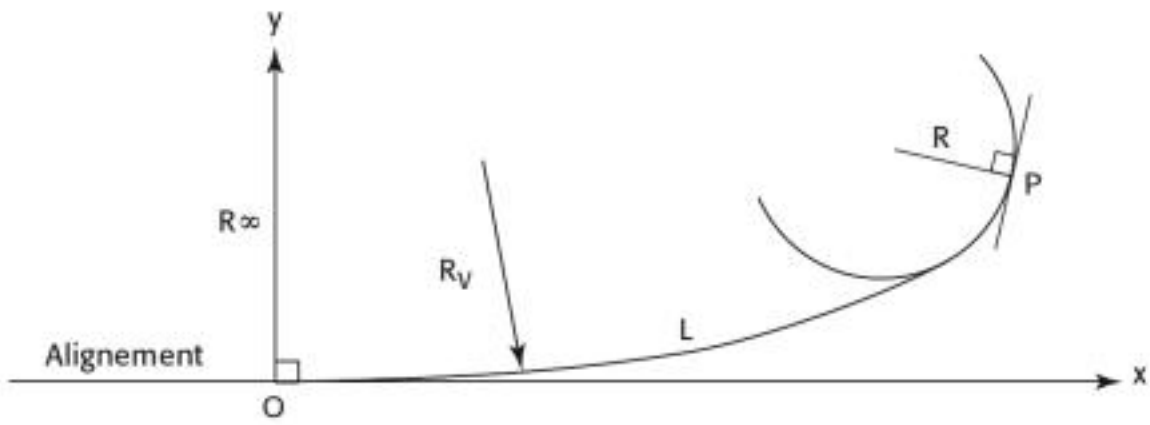


Figure 7.41. Arc de raccordement à courbure progressive.

La clothoïde est une courbe telle que la longueur de l'arc parcouru est proportionnelle à la courbure : $L = \frac{1}{R} \cdot Cte$; elle est constituée de 2 spirales (figure 7.42) qui s'enroulent autour des points asymptotiques J_1 et J_2 de la première bissectrice.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

8.1.1.2 Chaîne numérique

Le lasermètre, relié par interface à un ordinateur portable à écran graphique chargé d'un progiciel d'application développé, forme un système complet qui prend en charge toutes les étapes du travail, de la mesure au plan terminé.

Le technicien traite les données mesurées par voie électronique sous forme de chaîne numérique complète, en post-traitement ou en temps réel, ce qui lui permet de cheminer à travers les pièces et les étages d'un bâtiment.

Le lasermètre autorise le levé par rayonnement en 3D et le traitement automatique différé ou en temps réel avec le progiciel adapté (figure 8.2). Le topographe peut dès lors se concentrer sur l'identification et la codification des points à lever, quitter le site sans crainte d'avoir à y revenir du fait d'oublis ou d'omissions, compléter les documents établis par exploitation de bases de données existantes : circuits électriques, canalisations, etc.

Figure 8.2. Tripod GE.

Document Measurix

8.1.2 Levé des façades

Un nombre limité de points parfaitement identifiés, notamment à l'aide d'un détecteur laser autorisant le travail diurne, est aisément rayonné sans réflecteur à courte distance, en 3D, surtout si la précision recherchée n'est pas très grande.

Lorsque les distances ou la précision augmentent, l'intersection spatiale (figure 8.3) de 2 visées issues de 2 tachéomètres repérés l'un par rapport à l'autre fournit les coordonnées xyz du point ; c'est, réduite au minimum, la technique d'acquisition à distance sans contact, de données tridimensionnelles développées en métrologie géodésique (§ 8.4.1).

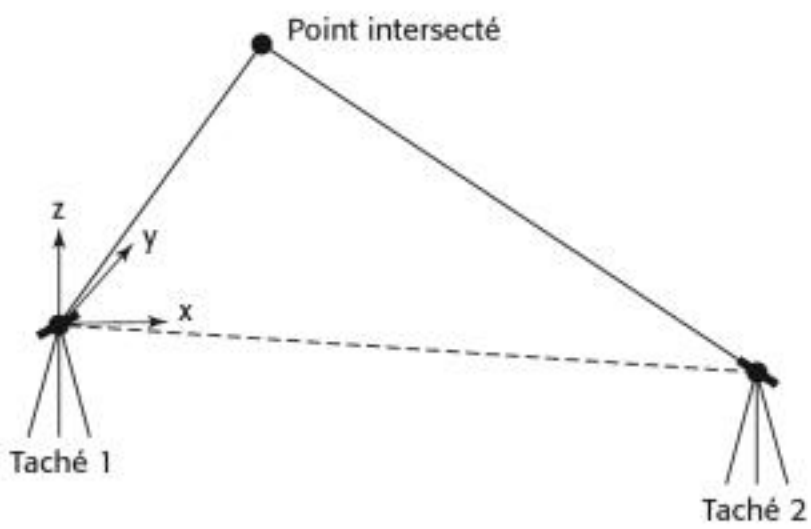


Figure 8.3. Intersection spatiale.

Dans le cas d'une façade verticale définie par les points P_1 et P_2 connus en xyz (figure 8.4), un point M, levé simplement par l'angle horizontal $\hat{A}$ et l'angle zénithal V, est aisé à déterminer : intersection de SH et P_1P_2 en planimétrie, hauteur HM = ST + SH × cotan V en altimétrie.

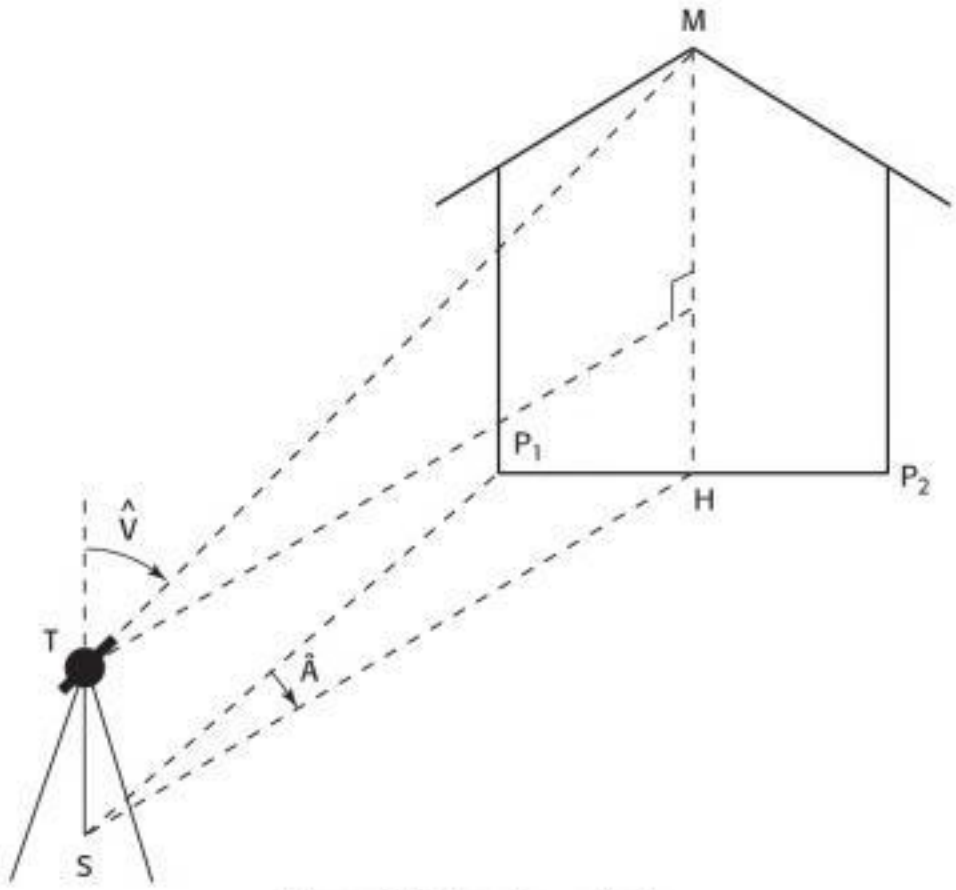


Figure 8.4. Façade verticale.

Le procédé est étendu aisément à une façade, des piliers, etc. inclinés, sous réserve de mesurer leur fruit, c'est-à-dire leur inclinaison par rapport à la verticale, à partir des écarts à un plan parallèle déterminé avec un laser rotatif vertical par exemple (figure 8.5).

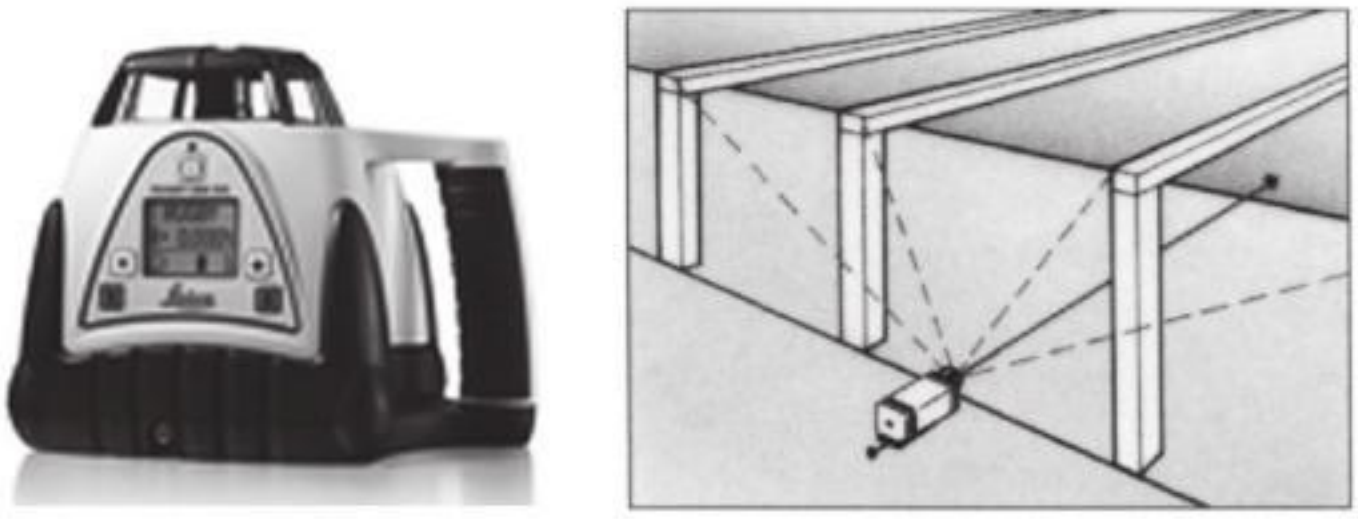


Figure 8.5. Laser rotatif vertical.

Document Leica

8.1.3 Contrôles de verticalité

8.1.3.1 Piliers et poteaux

La verticale étant l'intersection de 2 plans de visée verticaux, 2 théodolites placés dans 2 plans perpendiculaires contrôlent aisément la verticalité d'un pilier ainsi que son positionnement planimétrique.

Les systèmes GPS de haute précision permettent de placer très précisément les piliers : l'ordinateur de bord guide l'opérateur par l'intermédiaire d'un écran graphique convivial, des inclinomètres et contrôleurs de profondeur interfacés vérifient le positionnement en temps réel.

La mise en place de grandes structures préfabriquées de béton ou d'acier est réalisée par GPS avec précision, rapidité et sécurité.

8.2 Travaux publics

Dans le cadre des études d'exécution, le topographe, au cours du levé du MNT, doit porter une attention particulière aux réseaux d'assainissement existants, en particulier veiller à la détermination précise des fils d'eau ou radiers, à ne pas confondre avec les fonds de regards (figure 8.7).

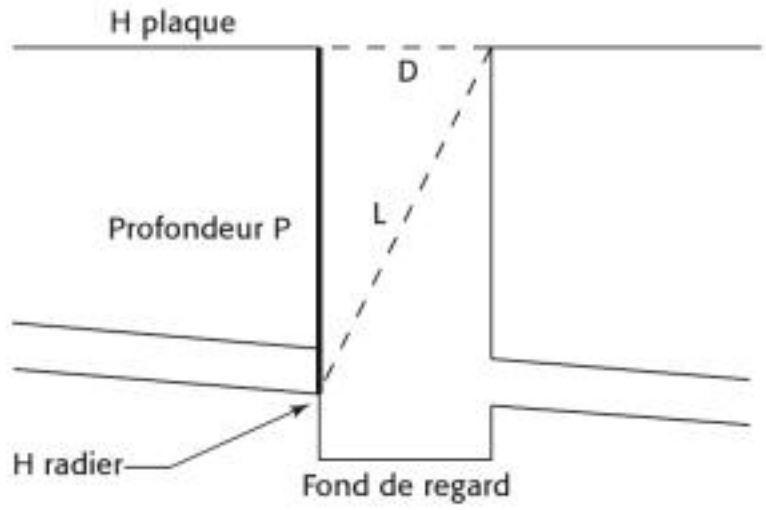


Figure 8.7. Détermination de l'altitude d'un radier.

Mesures L et P

$$\text{H radier} = \text{H plaque nivelée} - \text{P} = \text{H plaque} - \sqrt{L^2 - D^2}$$

8.2.1 Entrées en terre et gabarits de talutage

Les gabarits de talutage guident les engins de terrassement en matérialisant, à chaque profil en travers (§ 10.1.5.3), le bas ou le haut de talus et son inclinaison.

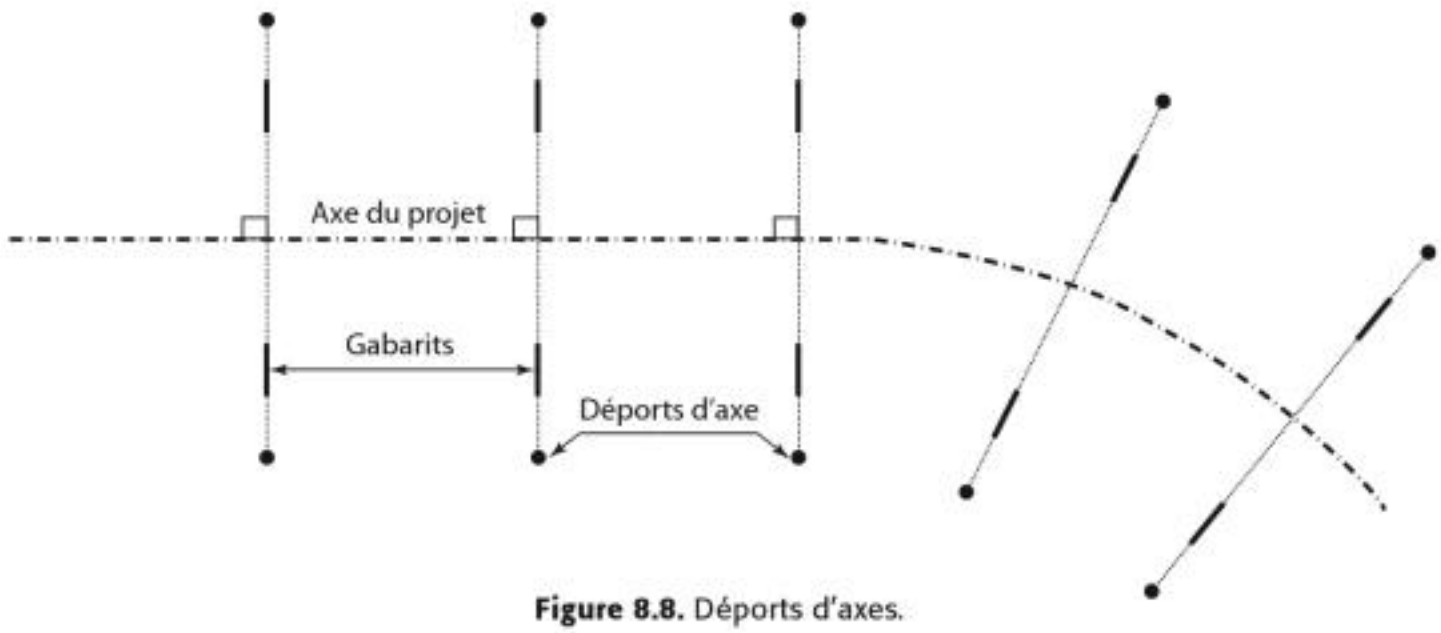


Figure 8.8. Déports d'axes.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

$$En_a = E_1 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta E_i \ , \qquad Nn_a = N_1 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta N_i$$

D'où les écarts de fermeture : $e_E = En_a - En$, $e_N = Nn_a - Nn$, en tout état de cause petits en valeurs absolues puisque dus uniquement à l'imprécision des coordonnées.

Le point extrémité n étant unique, ses coordonnées En et Nn connues dans le système général le sont aussi, ce qui contraint le calculateur à résorber les écarts de fermeture en appliquant des corrections en abscisse c_E et en ordonnée c_N.

$$En = En_a + c_E \quad \Rightarrow \quad c_E = En - En_a = -e_E$$
$$Nn = Nn_a + c_N \quad \Rightarrow \quad c_N = Nn - Nn_a = -e_N$$

Les coordonnées de l'extrémité approchée n_a provenant de celles de l'origine qui ne peuvent être modifiées, ainsi que des Δ, l'ajustement consiste à répartir les corrections c_E et c_N sur les différences de coordonnées des vecteurs successifs, proportionnellement à leurs valeurs absolues par rapport à la somme de celles-ci ; pour le vecteur i les corrections partielles à appliquer à ΔE_i et ΔN_i valent donc :

$$c_{E_i} = \frac{c_E \cdot |\Delta E_i|}{\sum_{i=1}^{n-1} |\Delta E_i|} \qquad c_{N_i} = \frac{c_N \cdot |\Delta N_i|}{\sum_{i=1}^{n-1} |\Delta N_i|}$$

L'ajustement proportionnel, mal nécessaire qui n'est guère qu'une satisfaction de l'esprit, n'a aucun rapport avec une compensation telle que l'adaptation d'un canevas d'ensemble d'un système local à un système général, traitée par les moindres carrés par exemple.

Les différences de coordonnées corrigées fournissent les coordonnées des points, calculées de proche en proche de 1 à n : $E_{i+1} = E_i + (\Delta E_i + c_{E_i})$, $N_{i+1} = N_i + (\Delta N_i + c_{N_i})$

Contrôle, en vérifiant qu'en fin de sommation, on retrouve exactement les coordonnées connues de l'extrémité n.

9.2.5.4 Application

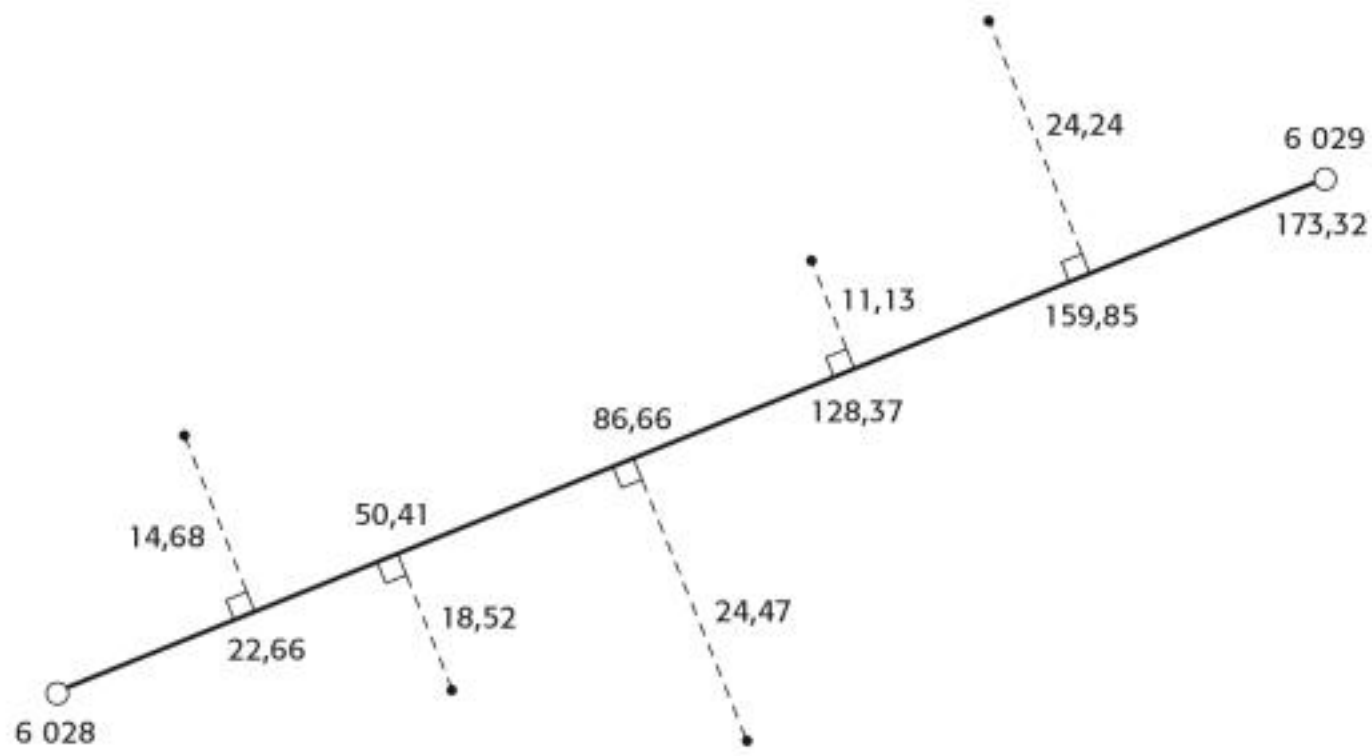


Figure 9.28. Abscisses et ordonnées sur un côté de cheminement polygonal.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

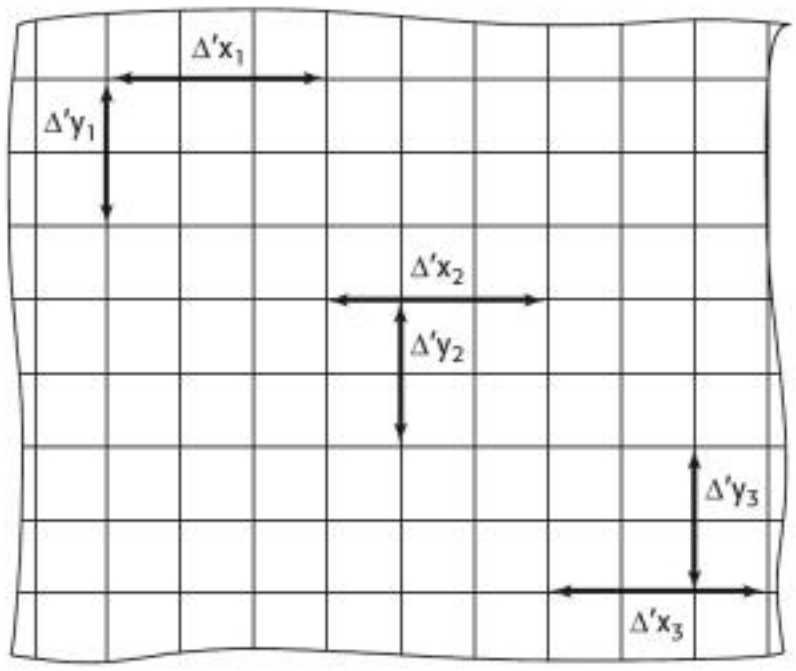


Figure 9.51. Mesurage des côtés de carreaux.

En quelques endroits de la feuille judicieusement répartis (figure 9.51), mesurer après variations les côtés de carreaux Δ'x et Δ'y.

Pour des modules de jeu m_x en abscisses et m_y en ordonnées, on peut écrire :

$$\Delta x = m_x \cdot \Delta' x, \qquad \Delta y = m_y \cdot \Delta' y$$

D'où les modules de variation :

$$m_x = \frac{\frac{\Delta x_1}{\Delta' x_1} + \frac{\Delta x_2}{\Delta' x_2} + \frac{\Delta x_3}{\Delta' x_3}}{3}, \qquad m_y = \frac{\frac{\Delta y_1}{\Delta' y_1} + \frac{\Delta y_2}{\Delta' y_2} + \frac{\Delta y_3}{\Delta' y_3}}{3}.$$

Tenir compte de ces modules pour certaines mesures d'exploitation :

Coordonnées d'un point

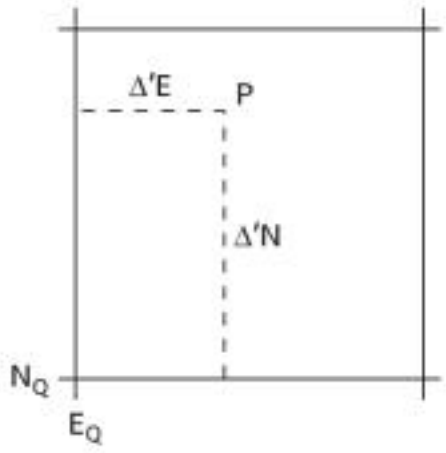


Figure 9.52. Appoints mesurés.

Mesure des appoints Δ'E et Δ'N (figure 9.52) ; $E_P = E_Q + m_E \cdot \Delta' E$, $N_P = N_Q + m_N \cdot \Delta' N$

Distance rectiligne

Coordonnées des extrémités, puis conversion R → P

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Le fichier raster fourni par le scanner contient un nombre de valeurs 0 (blanc) ou 1 (noir) considérable, environ 9 millions pour une feuille A4 en 300 dpi. Ces fichiers se révèlent rapidement lourds à gérer et donnent du plan initial une image fidèle. Mais les éléments scannés se réduisent à un ensemble de points indépendants les uns des autres, c'est-à-dire ne constituant pas une entité comme une ligne ou un cercle, et ne peuvent donc pas être gérés avec les outils conventionnels d'Autocad ; il faut donc *vectoriser*, c'est-à-dire structurer les fichiers raster pour obtenir les objets graphiques individualisés. Des logiciels existent, qui différencient dans un premier temps les caractères formant les polices d'écriture, puis les éléments du dessin proprement dit, travail assez lourd qui requiert des essais préalables ; selon la qualité et la densité d'information du plan initial, le logiciel de vectorisation introduit nécessairement des erreurs qu'il y a lieu de détecter et de corriger, ce qui peut être très fastidieux dans certains cas.

Désormais la numérisation des plans peut être effectuée avec une caméra numérique à très haute définition ; le logiciel récupère et traite le document pour l'enregistrer compressé (Jumboscan – Lumière Technology).

10.4 Présentation

10.4.1 Formats

Dans la mesure du possible, utiliser les formats normalisés, norme Afnor NF Q 02 000, A0 = 1 m^2 et côtés dans le rapport $\sqrt{2}$ (figure 10.49).

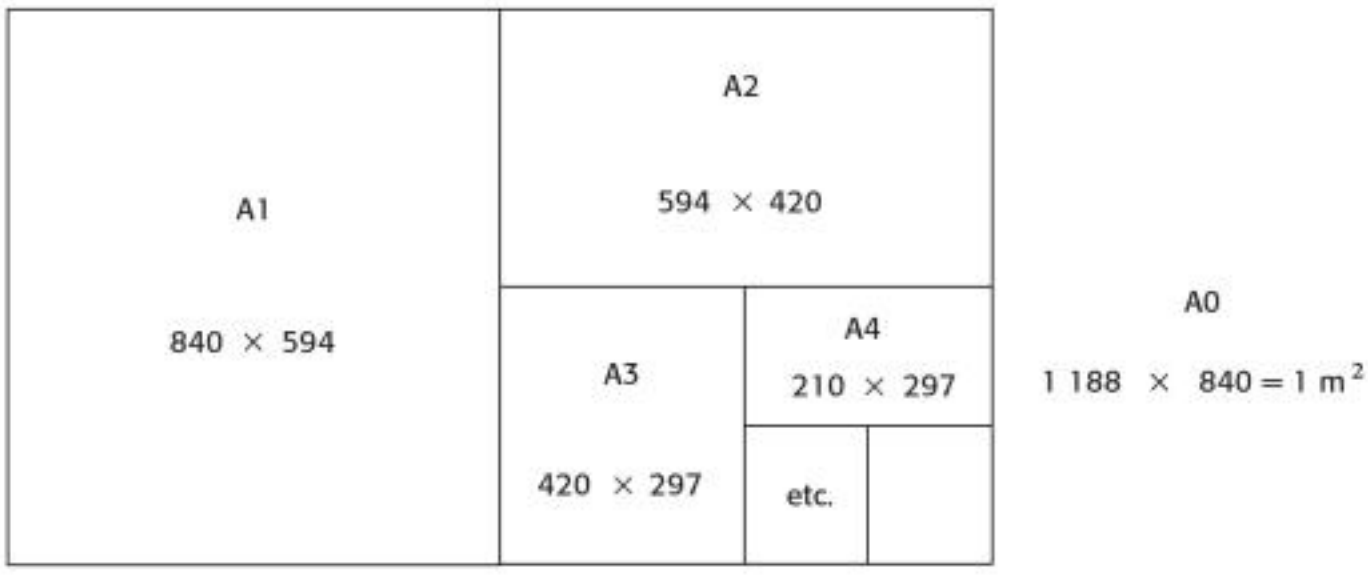


Figure 10.49. Formats normalisés

Toutefois, des formats différents, adaptés au travail considéré, sont utilisés :

- le format commercial Grand Aigle : 1,05 m × 0,75 m, pour les plans cadastraux ;
- les « bandes d'étude », en tracé routier par exemple, pour lesquelles le dessin se développe en longueur en restant limité en largeur, utilisent plusieurs formats A4 accolés suivant lesquels on plie le papier en accordéon, d'où l'appellation « format n plis » (figure 10.50).

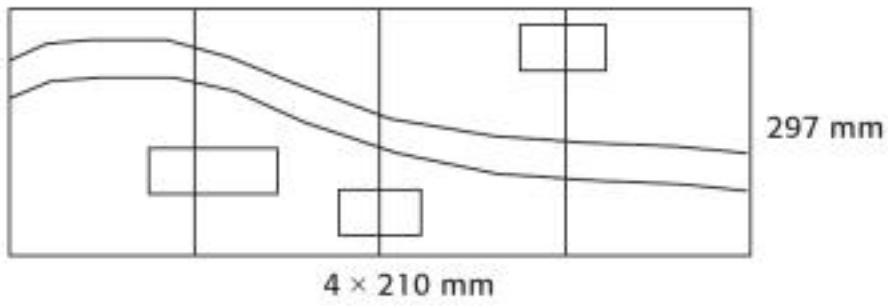


Figure 10.50. Format n plis.

Enfin, l'arrêté interministériel du 12 juillet 1976 prescrit les normes de découpage, d'immatriculation, de désignation et de présentation des plans topographiques établis aux échelles 1/5 000 à 1/200 exclusivement, en coupures ; la partie dessinée a une forme rectangulaire 70 × 50 cm, le petit côté du rectangle est parallèle à l'axe des ordonnées du système Lambert ; elle est établie sur un support matériel stable de format A1.

L'arrêté précité ne peut cependant être opposé à l'établissement de plans dont la nature même impose un découpage particulier, comme les plans d'alignement, profils en long, etc.

10.4.2 Habillage

Les écritures sont disposées au mieux de la présentation et de l'intelligence du plan, à l'endroit, c'est-à-dire leur base tournée vers le milieu du bord inférieur de la feuille (figure 10.51).

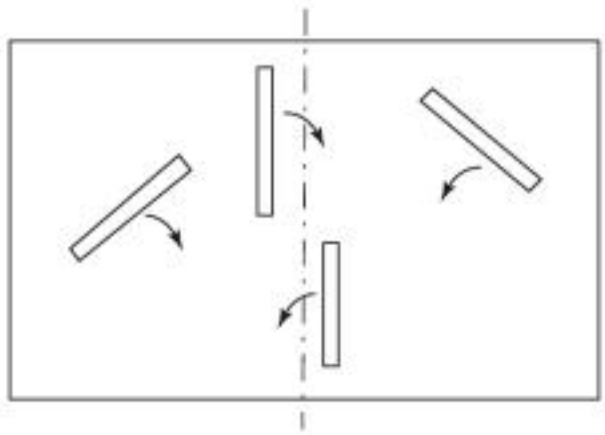


Figure 10.51. Disposition des écritures.

Les hachures concernent le plus souvent le bâti.

10.4.3 Indications

Les plans à grande échelle sont établis en respectant les signes conventionnels publiés épisodiquement depuis l'arrêté interministériel du 17mai 1957.

Vérification selon les instructions du maître d'ouvrage, reproduction et archivage suivant les moyens du maître d'œuvre.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Figure 6.3. Récepteurs GNSS.

Documents Garmin et Trimble

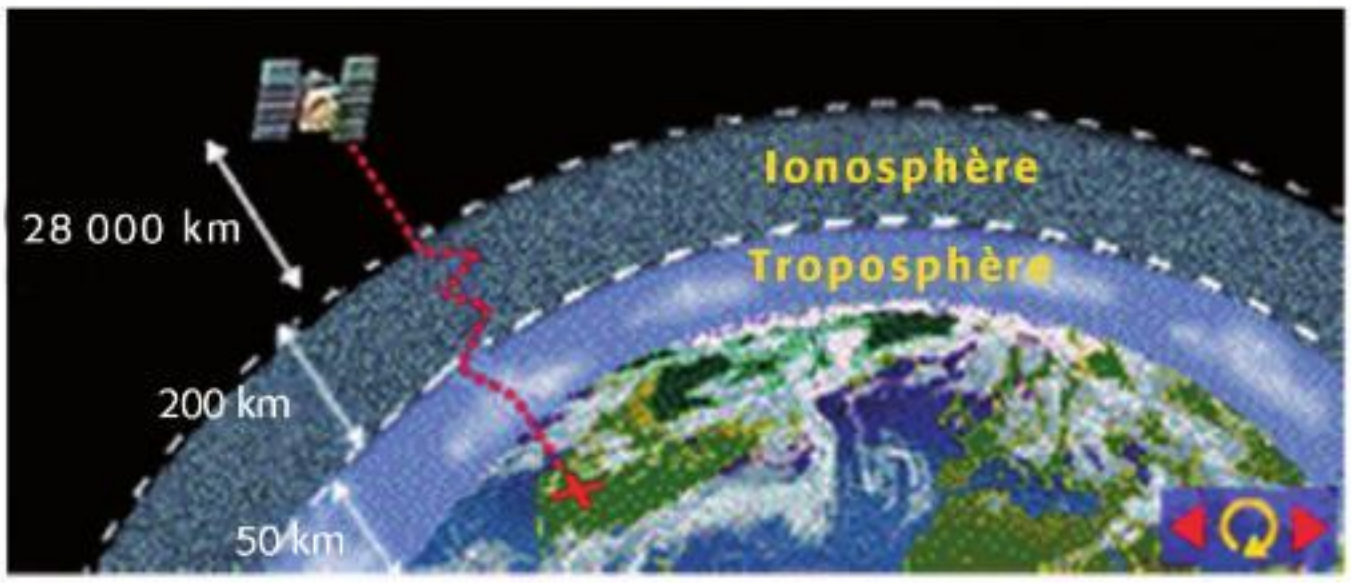


Figure 6.9. Erreurs troposphériques et ionosphériques.

Document Trimble

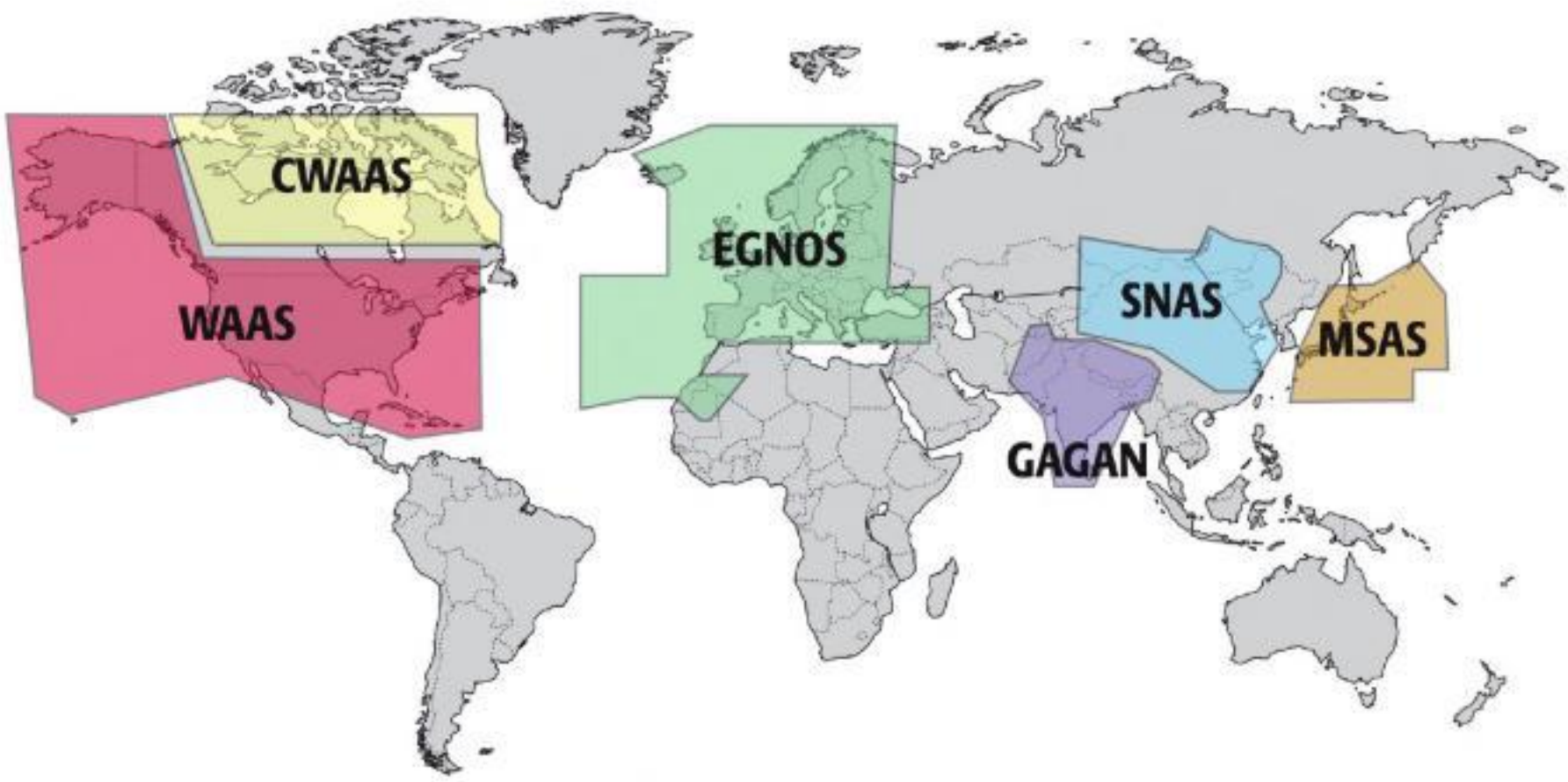


Figure 6.22. EGNOS.

D'après Francis Fusier

Éléments sous droits d'auteur

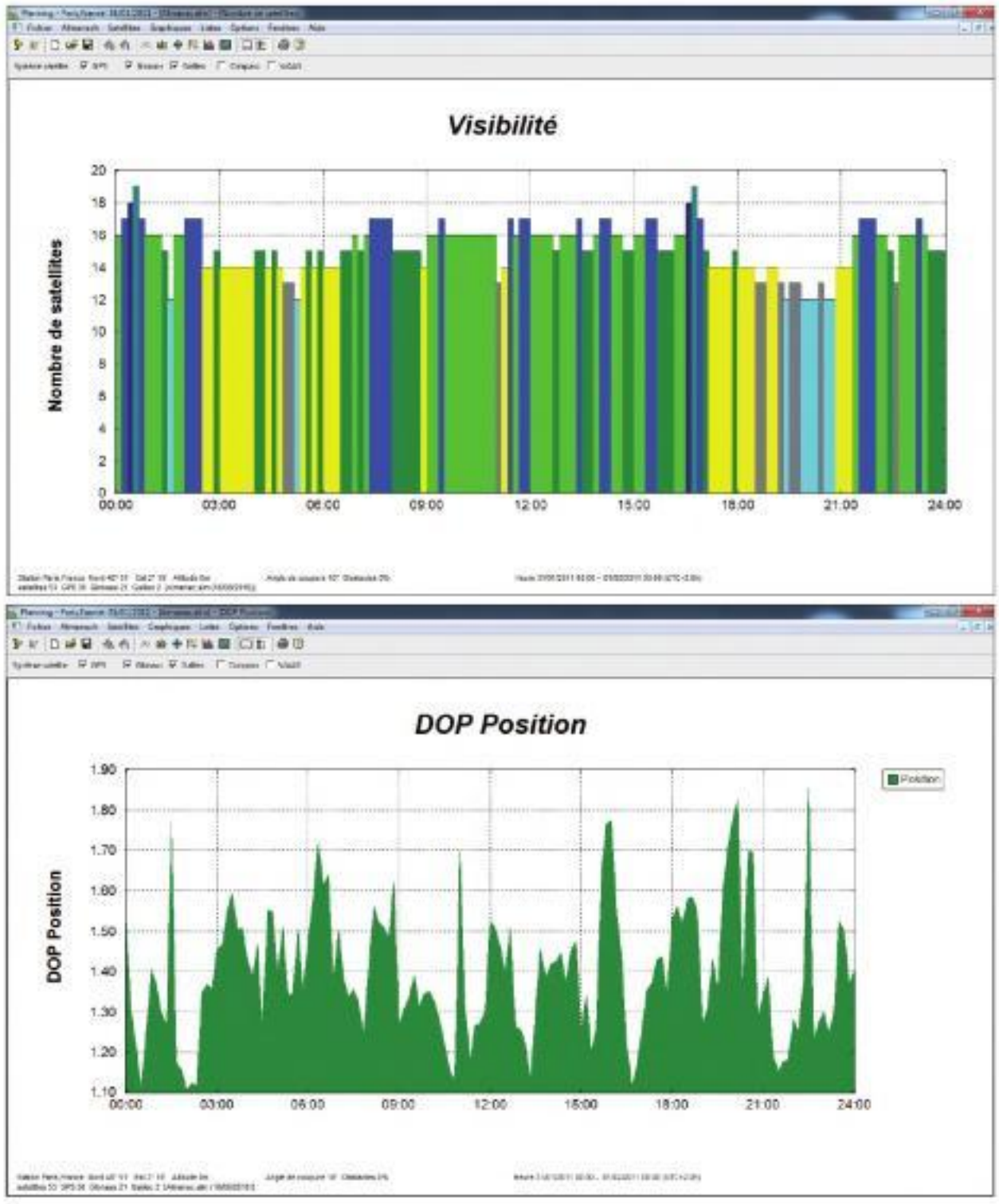


Figure 6.28. Prévisions GNSS.

Documents Trimble

Document Trimble

Figure 7.17. Croquis assisté par ordinateur.

Document Leica

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

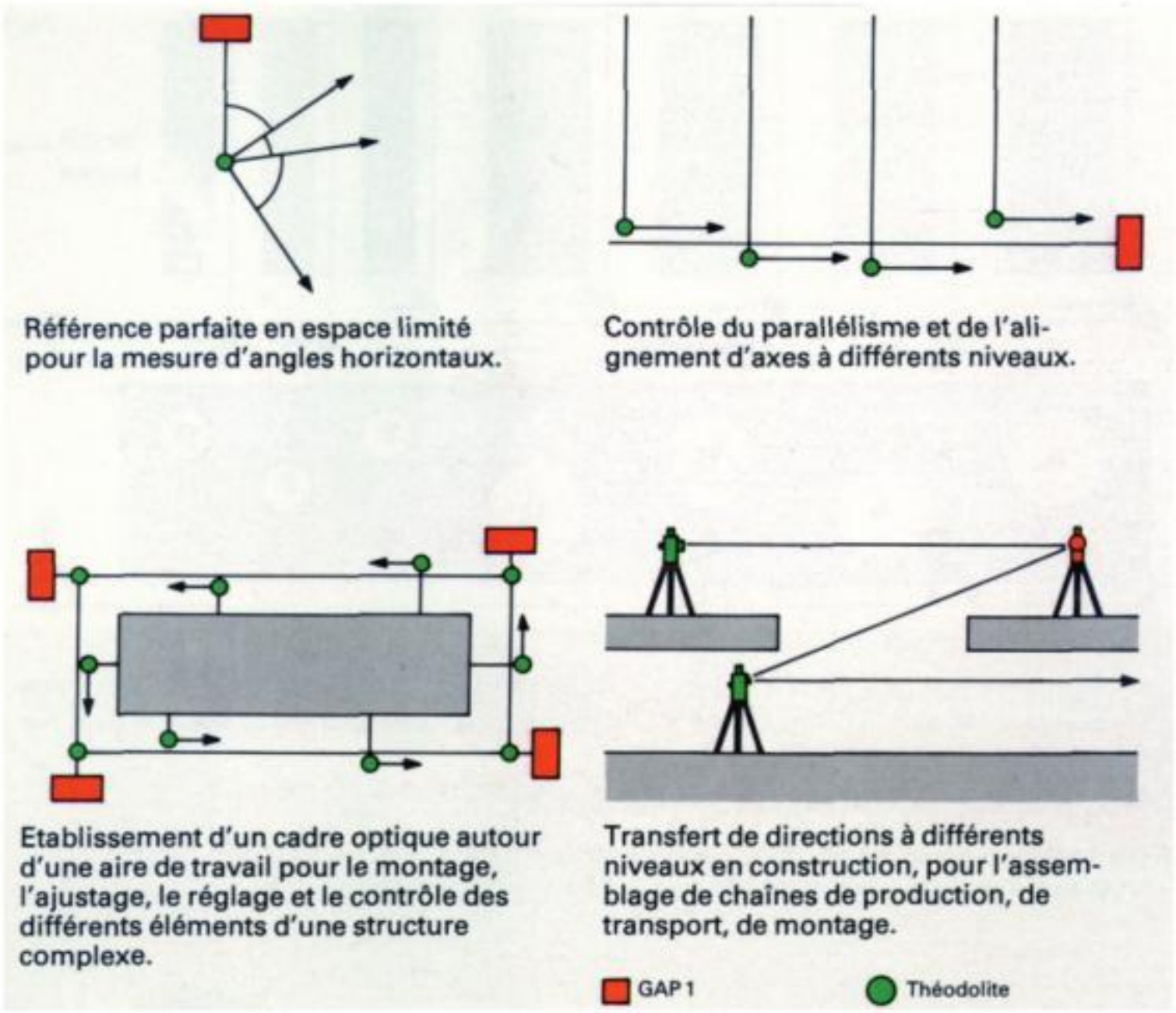


Figure 8.17. Mise en œuvre du prisme d'autocollimation.

Document Leica

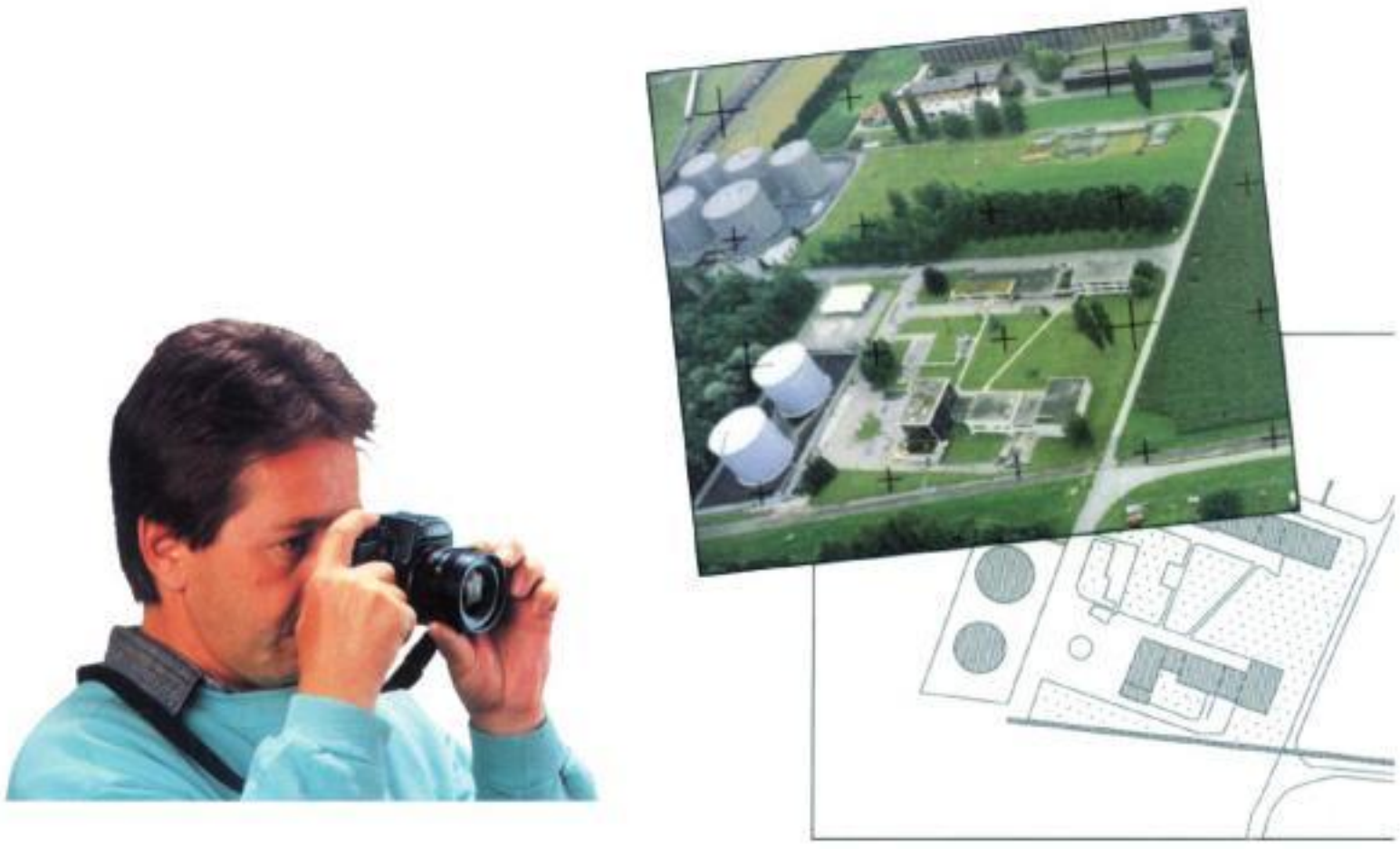


Figure 8.20. Photogrammétrie numérique multi-image, clichés quadrillés.

Document Leica

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Index

A

abscisse 202
algorithme itératif 348
altimétrie 1
altitude 17
angle 22
  azimutal 22
  de deux visées 22
  horizontal 22
  vertical d'une visée 23
arc de cercle tangent à des alignements droits 226
auscultation d'ouvrage 256
axe optique 64
azimut
  géographique 50
  magnétique 50

B

balayage 213
bassin versant 54
bathymétrie 261
BD Topo 55

C

calage 69
calcul
  en bloc 142
  itératif 344
  séquentiel 275
  topométrique 2, 267
canevas
  de nivellement 134
  de polygonation 163
  GNSS 189
  polygonal 142
carnet 208
carte de base 45
CC 9 zones 8
centrage 69
  forcé 165
cercle 57
  directeur 64
changement de repère orthonormé 287
cheminement
  aller et retour 122
  double à doubles points de mire 125
  double à doubles stations 123
  encadré 108, 148
  fermé 113
  nodal altimétrique 112
  nodal planimétrique 157
  planimétrique 142
chevelu 54
clothoïde 232
compensation par la méthode des moindres carrés 138
contrôle 24
  de verticalité 244
convergence des méridiens 6
coordonnée 278
  géographique 4, 5
  plane 5
correction 24
  d'index 75
cote géopotentielle 17

coupe et profil 53
courbe de niveau 51
croquis 207
cubature des terrassements 374

D

dénivelée
    élémentaire 106
    instrumentale 128
dessin topographique 2
dilatation 85
distance 23
distancemètre 93
division des surfaces 330
donnée
    attributaire 262
    géographique 262
DOP 193

E

échelle 2
échelon 61
éclimètre 75
ED50 (European Datum 1950) 13
ellipsoïde 4
enregistrement 222
entrée en terre 246
erreur
    accidentelle des mesures directes 27
    accidentelle des mesures indirectes 38
    GNSS 175
    parasite ou faute 24
    systématique 25
étalonnage 85

F

format 388
formule
    de Sarron 322
    polygonale 322

G

G_0 de station 282
gabarit de talutage 246
GALILEO 169
géocodification 223
géoïde 17
Géoportail 55
gisement 50
GLONASS 169
GNSS 24, 167
goniomètre 57, 62
GPS 24, 168

H

hauteur ellipsoïdale 5

I

implantation 3, 224
    GNSS 185
infographie 383
insertion 138
intersection 137
    de cercles 296
    de droites 294
    de visées 293

J

jalonnement 81
jeu du papier 310

L

Lambert
    93 8
    Zone 6
latitude géodésique 5
lecture
    électronique 63
    optique 62
    sur mire ordinaire 104
levé
    des détails par GNSS 185
    des façades 243
    d'intérieur 241
    topographique 1
ligne
    caractéristique 211
    et forme caractéristiques 53
limite et point 201
localisation des erreurs parasites 154
logiciel 385
longitude géodésique 5

M

méridien 4
mesurage
    direct 24
    électronique 89
    indirect 24
mesure GNSS
    cinématique 182
    mode absolu 180
    mode différentiel 178, 181, 184
    par la phase 174
    par le code 173
    pivot central 189

statique 181
temps réel 184
méthode des trois trépieds 165
métrologie
géodésique 252
photogrammétrique 255
mire 102
mouvement 63
multilatération des détails 206

N

niveau 102
nivelle
électronique 61
sphérique 59
torique 60
nivellement
direct ordinaire 101
géodésique 128
géométrique de précision 119
géométrique motorisé 127
trigonométrique 131
normale 17
NTF 12
nuage de points 3D par scanner 210

O

observation 1
topographique 22
ordonnée 202
orientation 77
orographie 51
orthométrique 17

P

paire de séquences 71
parallèle 5
pente 52
photogrammétrie 256
piquetage planimétrique 235
plan
de récolement 239
graphique 2
numérique 2, 383
numérisé 2, 387
topographique 2
planimètre 306
planimétrie 1
point
à lever 199
coté 51
de canevas 137
nodal 112
Voir cheminement nodal
positionnement satellitaire 24, 167
précision 87, 95, 116, 126
des mesures d'angles 66
profil 213, 360
en long 364
en travers 369
progiciel 3
projection
aphylactique 6
UTM 9
prolongement 84

Q

quadrillage 213

R

rabattement 286
raster 265
rattachement 286
rayonnement 206
RBF 15
RDF 15
reconnaissance 200
recoupement 138
élémentaire 305
redressement des limites 327
relèvement 137
double 303
sur trois points 297
repère
altimétrique 236
de nivellement 18
réseau
de nivellement 17
permanent 187
RGE 55
RGF93 (Réseau géodésique français 1993) 13
RGP 187
RRF 13

S

SCAN 25 55
secteur
contrôle 170
utilisateur 170
semis de points 211
sensibilité d'une nivelle 60
séquence 70
SGBD 265
SIG 262

signal GNSS 172
station
    excentrée 284
    libre 138
suivi et contrôle des ouvrages 3
superficie
    d'un polygone défini en coordonnées polaires 317
    graphique 305
surface
    digitalisée 309
    topographique 4
système
    conforme 6
    d'altitudes 17
    de projection 5
    équivalent 6
    géodésique 12

T

tachéométrie 214
théodolite 22, 57
tolérance 38
topographie 1
    souterraine 249
topométrie 1
tour d'horizon 73
traitement des observations GNSS 195
transformation
    de coordonnées 10
    d'Helmert 141
travaux topographiques 1

V

vecteur 265

You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Topographie opérationnelle

Mesures – Calculs – Dessins – Implantations

À la base de tous les travaux de génie civil, la topographie est un ensemble de techniques qui, partant de la mesure, conduisent à l'aménagement du terrain – que l'on représente désormais en 3D.

Dans ce nouveau manuel volontairement opérationnel et abondamment illustré, on trouvera notamment la description précise des instruments de mesure et un exposé détaillé des méthodes de travail, avec calculs, dessins et techniques d'implantation.

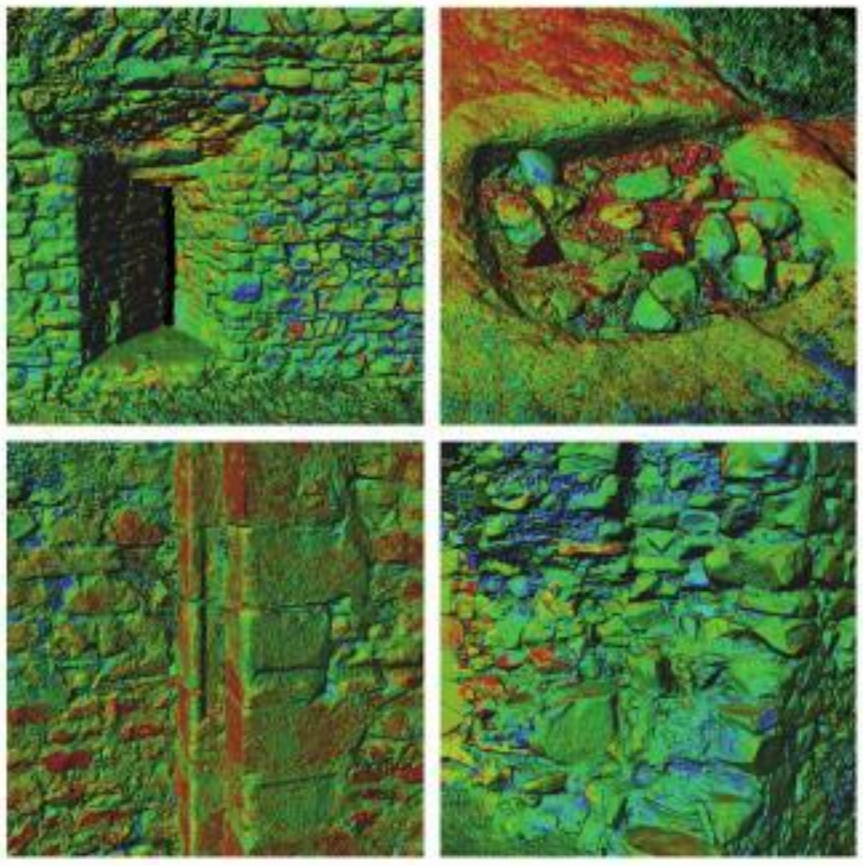
Destiné à la formation des topographes, il permettra aussi aux praticiens confirmés, de l'opérateur à l'ingénieur, d'actualiser leurs connaissances.

Sommaire

- Connaissances de base
- Mesures des angles
- Mesures des distances
- Nivellement
- Localisation terrestre
- Positionnement satellitaire
- Levé des détails et implantations
- Travaux topographiques spécifiques
- Calculs topométriques
- Dessins et plans

Index. Cahier hors texte en couleur

Professeur émérite, agrégé de génie civil, **Michel Brabant** est géomètre-expert DPLG. Auteur de *Maîtriser la topographie*, il a refondu ce grand classique avec le concours de trois certifiées de génie civil enseignant au lycée Henri Loritz de Nancy : **Béatrice Patizel** et **Armelle Piègle**, ingénieurs géomètres ESGT, et **Hélène Müller**, technicien supérieur géomètre-topographe.



barbarycourte.com | Photos © Arnaud Rostand et Sébastien Paulin, ESGT

Code éditeur : G12847
ISBN : 978-2-212-12847-5
www.editions-eyrolles.com
Groupe Eyrolles | Diffusion Geodif